

de la **PHYSIQUE** *reflets*

n° 67
novembre 2020

www.refletsdelaphysique.fr

Revue de la Société Française de Physique

Avancées de la recherche

Le Square Kilometre Array, un radiotélescope géant



n° 67 - novembre 2020



www.sfpnet.fr



Images de la physique

Peut-on parler
de suprématie
quantique ?

Histoire des sciences

Une femme physicienne
underground :
Mary Tsingou

Science et société

Le Palais
de la découverte :
un avenir incertain

Contribuer au débat public : l'exemple de la loi de programmation de la recherche

Historiquement, les sociétés savantes se sont d'abord donné comme mission principale de faire avancer la connaissance dans leur domaine d'activité, en regroupant des experts publiant des travaux de recherche originaux. Elles ont progressivement fédéré la communauté scientifique d'une discipline au sens large (chercheurs, enseignants, étudiants, amateurs...), en organisant des conférences et des congrès et en décernant des prix. Plus récemment, l'arrivée d'Internet et le rôle croissant des réseaux sociaux les ont conduites à vouloir faire entendre plus largement leur voix et à contribuer activement au débat public.

Comme détaillé dans notre dernier éditorial, la Société Française de Physique (SFP) a suivi cette évolution et a dans un passé récent publié, seule ou en association avec d'autres sociétés savantes, des positions touchant de nombreux domaines.

En 2020 nous nous sommes particulièrement mobilisés, en lien avec un collectif de sociétés savantes, autour du projet de loi de programmation de la recherche (LPR), afin de contribuer au débat parlementaire et d'influencer la rédaction finale de cette loi.

Malgré un investissement qui peut paraître important et certaines mesures globalement saluées, la première version du texte de loi a été l'objet de critiques des principaux acteurs du monde de la recherche (Académie des sciences, syndicats, Conférence des présidents d'université...) et d'institutions comme le Conseil économique, social et environnemental et le Conseil d'État. Il a été notamment reproché au projet sa durée inhabituellement longue (dix ans), le manque d'ambition et le flou de sa programmation budgétaire, et le déséquilibre entre le financement des laboratoires sur projets *via* l'ANR ou par crédits de base des établissements. Dans ce contexte, la SFP a initié ou s'est associée à un certain nombre d'actions, dont vous trouverez les principales étapes ci-dessous.

- Envoi le 5 juin d'un courrier (voir p. 38) initié par la SFP et cosigné par 35 autres sociétés savantes en vue d'alerter la ministre de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation (MESRI) sur plusieurs points nous paraissant critiques.
- Suite à ce courrier, une invitation de Mme Frédérique Vidal a permis à une délégation de 26 membres du collectif des sociétés savantes de se rendre au MESRI le 27 juillet et d'aborder successivement les modalités de financement de la recherche, la programmation budgétaire et les questions liées à l'emploi (voir p. 39).

- Élaboration d'un document de propositions [1] à l'attention des député-e-s avant l'examen du texte de loi. Ces propositions ont été rédigées sous forme d'amendements, afin de faciliter une possible évolution de la loi durant son examen et dans l'espoir d'influer sur le débat parlementaire. Ce document nous a permis de mener différentes actions, tant sur le plan local (rencontres avec les élus) que sur le plan national (audition par la Commission culture du Sénat).

- Suite à ces actions, certaines de nos demandes ont été partiellement prises en compte dans le projet de loi revu par l'Assemblée nationale en septembre, en particulier l'inscription d'une possibilité de réviser les crédits alloués en fonction de l'inflation, la mention du fléchage des crédits alloués aux organismes et universités, l'augmentation du nombre de postes pérennes... Nous avons alors adressé nos propositions, remises à jour pour tenir compte des avancées obtenues, à la Commission culture du Sénat qui a examiné le texte de loi la dernière semaine d'octobre.

Une commission mixte paritaire Sénat/Assemblée s'est tenue le 9 novembre pour harmoniser les textes, et la loi a été finalement adoptée par l'Assemblée nationale le 17 novembre. Les espoirs d'infléchissements significatifs du texte ont été déçus et les amendements introduits à la dernière minute (l'expérimentation du recrutement d'enseignants-chercheurs sans qualification par le Conseil national des universités et la pénalisation des intrusions dans les universités) ont suscité de violentes réactions au sein de la communauté.

Malgré quelques avancées (prise en compte possible de l'inflation, réduction du volume de chaires juniors, importance accordée à l'intégrité scientifique, première « marche budgétaire » augmentée), le résultat final reste très décevant au regard des efforts de toutes celles et tous ceux qui se sont mobilisés *via* leurs sociétés savantes pour essayer de faire évoluer le projet initial.

Il est cependant clair que ces actions conjointes auront permis de faire découvrir aux politiques le caractère spécifique des sociétés savantes et leur grande utilité potentielle comme « corps intermédiaire », et de renforcer ainsi la crédibilité de la SFP.

Cette démarche collective débouchera vraisemblablement sur la création formelle en 2021 d'une fédération des sociétés savantes. La SFP participe activement à ces réflexions et aura à se prononcer à ce sujet l'année prochaine.

Catherine Langlais, présidente de la SFP
Guy Wormser, vice-président de la SFP

[1] https://cutt.ly/sfpnet_Societessavantes_Assembleenationale



© SKA Organization

En couverture : interprétation d'artiste des paraboles du radiotélescope géant SKA1-MID en Afrique du Sud (voir article, p. 10).

Comité de rédaction

Président : Stefano PANEBIANCO

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

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

Directeur de la publication : Jean-Paul DURAUD

Rédacteur en chef : Charles de NOVION

Conception : Lætitia MORIN - Keith VILLEMEUR

Réalisation graphique : Lætitia MORIN

laetitiamorin-graphiste.fr

Suivi de rédaction : Agathe CYMER

Communication : Mayline VERGUIN

Service publicité : Bernadette DUFOUR

publicite@edpsciences.org

Dépôt légal : 4^e trimestre 2020

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

© SFP - Édité à 2700 exemplaires

Imprimé par JOUVE-PRINT

733, rue Saint-Léonard - 53100 Mayenne

Société Française de Physique

33, rue Croulebarbe, 75013 Paris

Tél. : 01 44 08 67 10 - Fax : 01 44 08 67 19

e-mail : contact@sfpnet.fr - Serveur : www.sfpnet.fr

Reflets de la physique

Contact : reflets@sfpnet.fr

Serveur : www.refletsdelaphysique.fr

Les exemplaires de ce numéro destinés aux abonnés sont accompagnés par un catalogue de la société Edmund Optics.

Éditorial

- 2 **Contribuer au débat public : la loi de programmation de la recherche**
Catherine Langlais et Guy Wormser

Images de la physique

- 4 **Peut-on parler de suprématie quantique ?**
Michel Le Bellac

Avancées de la recherche

- 10 **Le Square Kilometre Array (SKA) : un radiotélescope géant**
Chiara Ferrari
- 15 **Brève : Détecter l'état électronique d'un atome en mesurant sa masse**
- 16 **La croissance des villes vue par la physique statistique**
Marc Barthélémy

Histoire des sciences

- 21 **Les premières réactions de fusion nucléaire induites par laser**
Jean-Louis Bobin
- 26 **Mary Tsingou et l'histoire de la première expérience numérique**
Thierry Dauxois

Science et société

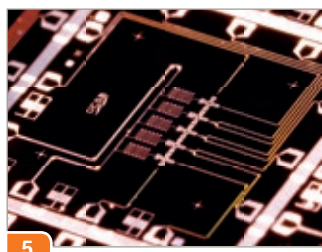
- 31 **Le Palais de la découverte : un avenir incertain**
Daniel Hennequin et la commission Culture Scientifique de la SFP

Au sein et autour de la SFP

- 38 **Lettre sur le projet de loi de programmation de la recherche**
- 39 **Actualités**
- 42 **Revue de l'American Physical Society : la qualité pour un juste prix !**
- 43 **Prix scientifiques**
- 44 **Disparition : Robert Klapisch**

Reflets de la physique et ses lecteurs

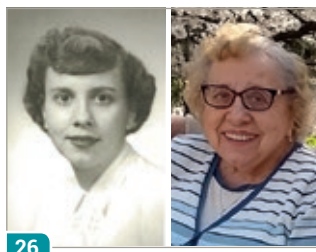
- 45 **Note de lecture**
- 46 **Tribune libre : La recherche, un droit mondial**
Michèle Leduc, François Piuze, Michel Spiro et Annick Suzor-Weiner



5



17



26



31

Peut-on parler de suprématie quantique ?

Michel Le Bellac (Michel.Le_bellac@inln.cnrs.fr)

Professeur émérite, Université Côte d'Azur

Une équipe de Google (Arute *et al.*) a affirmé récemment avoir démontré la « suprématie quantique ».

Après avoir introduit brièvement les notions de qubit et d'ordinateur quantique, cet article se propose de définir aussi précisément que possible ce que recouvre le concept de suprématie quantique et examine dans quelle mesure les affirmations de Arute *et al.* sont fondées.

Je suis très reconnaissant à Charles de Novion, Daniel Estève, Michèle Leduc, Sébastien Tanzilli et Xavier Waintal pour leur lecture critique d'une version préliminaire de cet article et pour leurs suggestions.

En octobre 2019, Google annonçait qu'une de ses équipes avait « démontré la suprématie quantique ». Un article de Arute *et al.* suivait, publié dans *Nature* **574** (2019) 505-510, décrivant la réalisation expérimentale d'un ordinateur programmable de 53 qubits. Dans ce contexte, établir la suprématie quantique consiste à démontrer qu'un calcul peut être effectué en quelques heures par un dispositif fonctionnant selon les règles quantiques, alors que les plus puissants des ordinateurs classiques ne pourraient pas obtenir le résultat en un temps raisonnable. Cet énoncé est délibérément vague (« raisonnable ») et arbitraire (« quelques heures ») et sera précisé, autant que faire se peut, dans la suite de cet article. Avant d'aborder le cœur du sujet, je commencerai par un bref rappel sur les briques de base de l'ordinateur quantique : le « qubit », le principe de superposition et l'intrication. Pour plus de détails sur ces sujets, je renvoie à l'encadré « Superposition cohérente, qubits et intrication » de l'article de Michèle Leduc et Sébastien Tanzilli [1]. J'examinerai ensuite les algorithmes quantiques, le problème difficile de la correction des erreurs et enfin la suprématie quantique.

Principes de l'ordinateur quantique

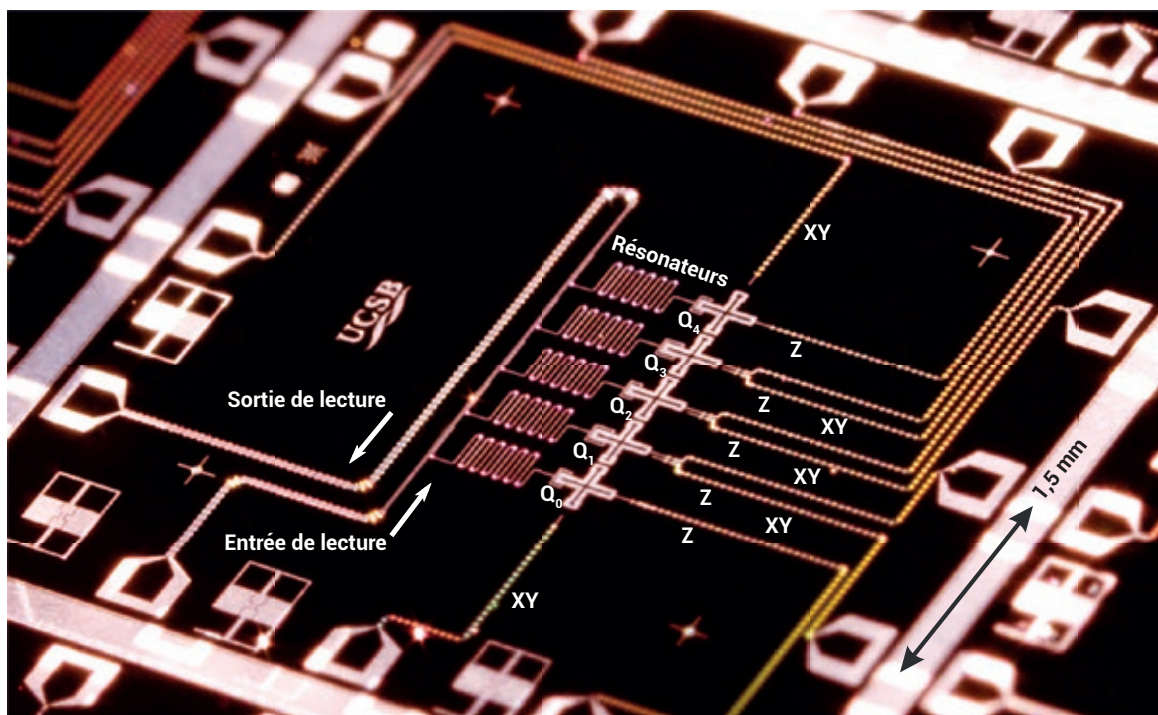
De façon très schématique, un algorithme classique mis en œuvre sur un ordinateur standard effectue des opérations bien définies sur des données exprimées sous forme de « bits », des entités qui peuvent prendre exclusivement les valeurs 0 ou 1, et dont les supports physiques sont des objets classiques : aimants, condensateurs, impulsions laser, etc. Ces bits peuvent être enregistrés au départ du calcul dans une mémoire sous forme d'une suite de 0 et de 1 : c'est le registre de données.

Un bit quantique, ou en abrégé « qubit », peut exister non seulement dans l'un des deux états de base où sa valeur est 0 ou 1, mais aussi dans une superposition linéaire de ces deux états. Un qubit est en fait ce que l'on appelle en physique quantique un système à deux niveaux, en général deux niveaux d'énergie E_0 et E_1 , correspondant à des états quantiques de base $|0\rangle$ et $|1\rangle$, avec les notations habituelles. L'exemple emblématique de qubit est le *spin* 1/2, où les deux états quantiques sont les deux états d'énergie différente du *spin* 1/2 dans un champ magnétique. On peut aussi citer les deux états d'énergie d'un atome ou d'un ion à deux niveaux, ou encore les deux états de polarisation orthogonaux d'un photon. Les deux états de base sous-tendent un espace vectoriel complexe à deux dimensions, et l'état le plus général est représenté par un vecteur $|\varphi\rangle$ de cet espace, une superposition linéaire des deux états de base avec deux coefficients a et b qui sont des nombres complexes :

$$|\varphi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle, \quad |a|^2 + |b|^2 = 1.$$

La physique quantique conduit à réviser de fond en comble la notion habituelle d'information, celle qui est portée par des objets classiques. L'information portée par des objets quantiques comme les qubits possède des propriétés radicalement nouvelles. Par exemple :

1. On ne peut pas dupliquer un état quantique inconnu^(a) : c'est le théorème de non-clonage quantique.
2. Il est impossible en général de distinguer avec 100% de succès deux états quantiques différents.
3. L'information portée par un état intriqué^(b) de deux qubits est distribuée sur ceux-ci, et elle est délocalisée si les deux qubits sont séparés spatialement. Alors que dans un ordinateur classique l'état d'un calcul est défini par les



1. Image optique d'un processeur intégré avec cinq qubits supraconducteurs. Les cinq qubits (Q_0 à Q_4 , au centre de la figure) sont en forme de croix et disposés suivant un réseau linéaire. À leur gauche on trouve cinq résonateurs formés de guides d'ondes résonants utilisés pour la mesure des qubits individuels. Le câblage dédié au contrôle et à la manipulation des qubits est situé à droite. Afin de minimiser la décohérence, l'énergie thermique doit être largement inférieure à la différence $\Delta E = E_1 - E_0$ entre les deux niveaux d'énergie E_0 et E_1 du qubit, et le processeur est maintenu à une température $T = 20$ mK grâce à un réfrigérateur à dilution, de sorte que $k_B T \ll \Delta E$. Source : R. Barends et al., *Nature*, 508 (2014) 500.

valeurs individuelles des bits à un certain instant, dans un ordinateur quantique l'information est distribuée sur l'ensemble des qubits *via* leurs corrélations, lesquelles ne peuvent pas être décrites par une distribution de probabilité classique.

Le phénomène de *décohérence* est intimement lié à l'intrication : si un qubit interagit quantiquement avec un environnement externe, alors l'évolution quantique se passe dans un espace plus grand que celui du qubit et on risque de détruire les superpositions linéaires, ou superpositions cohérentes, avec comme conséquence la perte du fil du calcul.

L'exécution d'un algorithme par un ordinateur quantique suit le schéma d'une expérience type de physique quantique, telle qu'on l'enseigne dans un cours de licence. L'expérience débute par une phase de préparation, où l'on fabrique un registre de données avec n qubits. Par exemple, si $n = 5$, le registre de données pourra se trouver dans un état $|\varphi\rangle = |01101\rangle$, où le premier qubit est dans l'état $|0\rangle$, le second dans l'état $|1\rangle$, etc. On applique ensuite une évolution unitaire U sur le registre de données, $|\varphi\rangle \rightarrow U|\varphi\rangle$, au

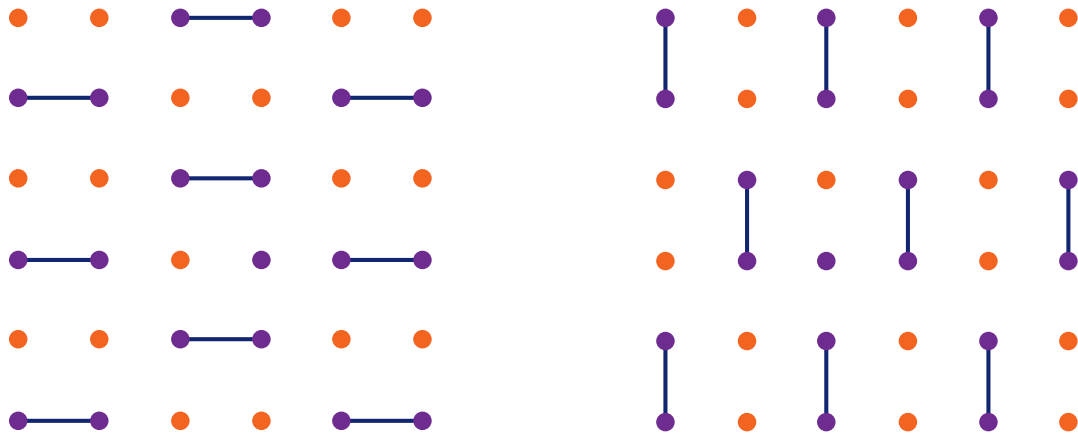
moyen de **portes logiques quantiques** : les qubits sont manipulés par des champs classiques, en général électromagnétiques, en utilisant le phénomène des oscillations de Rabi^(c). Les portes quantiques sont soit des portes individuelles agissant sur l'état d'un seul qubit, soit des portes dites « à deux qubits », agissant sur l'état global des deux qubits. Enfin, on effectue une mesure des qubits une fois terminée l'évolution unitaire nécessaire pour exécuter l'algorithme. En raison de la linéarité de la mécanique quantique, si l'on connaît l'action de la transformation U sur les états $|01101\rangle$ et $|10010\rangle$ par exemple, alors on la connaît aussi sur toute superposition $a|01101\rangle + b|10010\rangle$. Cette aptitude de l'ordinateur quantique à agir non seulement sur certains états précis mais aussi sur toute combinaison linéaire de ces états, est parfois appelée « parallélisme quantique ».

On pourrait (abusivement^(d)) en déduire qu'un algorithme quantique est susceptible d'explorer simultanément toutes les branches d'un calcul, mais la mesure finale des qubits ne laisse subsister qu'une seule de ces branches : c'est la fameuse « réduction du paquet d'ondes ». L'ordinateur quantique

va devoir utiliser toute la puissance des superpositions, interférences et intrications, pour faire émerger le résultat recherché de la mesure finale des qubits, et cela avec une certaine probabilité. C'est pourquoi la cohérence des qubits doit être soigneusement préservée tout au long du calcul, et c'est là le défi principal du calcul quantique.

La décohérence est donc l'ennemi public numéro un de l'ordinateur quantique. En effet, cette dernière, due au couplage des qubits avec leur environnement, détruit les délicates superpositions linéaires, et toute possibilité de calcul quantique s'effondre. Il faut d'une part isoler les qubits de leur environnement autant que faire se peut (fig. 1). Mais d'autre part le fonctionnement des portes quantiques, ainsi que les mesures, exigent des interactions des qubits avec des champs extérieurs. Les champs classiques ne s'intriquent pas avec les qubits et n'entraînent pas de décohérence. Néanmoins, isoler les qubits de leur environnement et agir efficacement sur eux sont deux exigences qui peuvent *a priori* être difficiles à concilier.

>>>



2. Version très schématique de l'architecture du processeur de Google.

Les qubits sont disposés suivant un réseau bidimensionnel 6 x 6 et peuvent interagir avec leurs plus proches voisins (portes à deux qubits). La figure décrit deux cycles successifs du calcul. À chaque cycle, les qubits représentés par des points rouges sont soumis à l'action de portes individuelles, tandis que les qubits représentés par des points bleus, reliés par un trait, sont soumis à l'action de portes à deux qubits. À l'intérieur d'un cycle, les portes peuvent être exécutées dans un ordre arbitraire car les opérations quantiques correspondantes commutent.

>>>

Algorithmes et erreurs quantiques

Il existe un nombre très limité (autour de cinq selon la manière dont l'on compte) d'algorithmes quantiques qui surpassent les classiques. Le plus connu est l'algorithme de Shor, qui permettrait de casser le chiffrement RSA, universellement utilisé pour crypter des données. En effet, dans ce chiffrement, on se donne un nombre entier N très grand, produit de deux nombres premiers p et q : $N = pq$. Le nombre N est public, mais p et q sont gardés secrets. L'algorithme de Shor permet, étant donné N , de trouver les facteurs p et q et de casser le chiffrement RSA. La taille du problème est donnée par le nombre n de bits nécessaires dans le registre de données, qui dans ce cas est tout simplement déduit de $N = 2^n$. La procédure de chiffrement utilise un cas particulier de fonction dite à sens unique, une fonction facile à calculer mais difficile à inverser : il est immédiat de faire le produit de deux entiers, mais long en temps de calcul, étant donné N , de trouver p et q . Le meilleur algorithme classique connu nécessite un temps proportionnel à $\exp(n^{1/3})$, alors que l'algorithme de Shor se contente de n^3 . On passe d'un temps exponentiel (dans la taille des données) à un temps polynomial – c'est-à-dire un temps proportionnel à une puissance de n – et on observe donc un gain exponentiel. *Ce gain exponentiel est la signature de la suprématie quantique.*

Cependant, il convient de faire trois mises en garde.

1. L'exemple de l'algorithme de Shor est pour le moment purement théorique et la définition de la complexité du calcul, polynomiale ou exponentielle, n'est valable qu'asymptotiquement, pour $n \rightarrow \infty$.
2. Il n'est pas prouvé mathématiquement qu'aucun algorithme classique ne puisse faire mieux que $\exp(n^{1/3})$. Les experts estiment peu probable que l'on trouve un jour un algorithme polynomial pour la factorisation, mais ce n'est pas rigoureusement exclu.
3. On est très loin de pouvoir fabriquer un ordinateur quantique capable de factoriser un nombre de $2048 = 2^{11}$ bits (617 chiffres), ce qui signifierait l'acte de décès de tous les chiffrements RSA actuels. On estime qu'il faudrait de l'ordre de 10^8 à 10^9 qubits physiques pour un tel calcul alors que, nous allons le voir, nous sommes aujourd'hui limités à une centaine de qubits.

Un des handicaps majeurs du calcul quantique est la nécessité de corriger les erreurs. Les portes quantiques ne fonctionnent jamais correctement à cent pour cent, bien que des progrès considérables aient été faits ces dix dernières années sur leurs taux d'erreurs. Il en existe d'autres sources : décohérence due à des interactions avec le milieu extérieur, erreurs de mesure, dans la transmission des qubits, etc. Les codes correcteurs d'erreurs classiques

fondés sur la redondance ne peuvent pas se transposer directement au cas quantique en raison du théorème de non clonage, qui interdit de dupliquer les qubits pendant la phase de calcul.

Cependant, on a mis au point théoriquement des codes correcteurs d'erreurs quantiques, qui permettent de remplacer les opérations sur des qubits physiques par des opérations sur des qubits logiques formés avec des groupements de qubits physiques, et où les erreurs sont corrigées. Un code correcteur standard est celui de Steane, qui utilise un qubit logique et sept qubits physiques, auxquels ils faut ajouter tout un cortège de qubits auxiliaires destinés à détecter et corriger les erreurs tout au long du calcul. Avec le taux d'erreur actuel des portes quantiques, une estimation optimiste est qu'il faudrait aux alentours de 10^4 qubits physiques pour construire un qubit logique.

L'ère du NISQ et Sycamore

Compte tenu de l'état de l'art aujourd'hui, il est prudent de ne pas prendre pour argent comptant les ambitions affichées du calcul quantique, afin de ne pas susciter d'espoirs infondés. Que peut-on raisonnablement affirmer, étant donné que l'on sait aujourd'hui fabriquer un ordinateur quantique comportant une cinquantaine de qubits physiques ? En 2018, John Preskill, transfuge de la physique des particules et

auteur de contributions très importantes sur le calcul quantique, a proposé le concept de NISQ : *Noisy Intermediate Scale Quantum technologies* (« technologies quantiques bruitées d'échelle intermédiaire »), pour caractériser la situation actuelle du calcul quantique. Dans cette ère du NISQ, on dispose de processeurs quantiques comportant de 50 à 100 qubits (échelle « intermédiaire »), mais sans code de correction d'erreurs, d'où le qualificatif « bruité ».

Dans ces conditions, existe-t-il des problèmes où l'on peut prouver qu'un ordinateur quantique est « infiniment » plus rapide qu'un ordinateur classique, autrement dit peut-on déjà prouver la suprématie quantique ? Arute *et al.* ont mis au point un processeur de 53 qubits, construits avec des circuits supraconducteurs comprenant des jonctions Josephson, qui permettent de fabriquer des atomes artificiels à deux niveaux (fig. 1), et ils ont exploré une des pistes possibles, celle de « l'échantillonnage de circuits quantiques aléatoires ».

Dans le processeur de Google, baptisé *Sycamore*, les qubits sont disposés suivant un réseau à deux dimensions (fig. 2) et chaque qubit est susceptible de se coupler à l'un de ses plus proches voisins grâce à une porte à deux qubits. De plus, chaque qubit peut être soumis individuellement à l'action d'une porte quantique choisie de façon aléatoire parmi trois portes possibles, ce qui fabrique un circuit quantique aléatoire. Quelques données numériques : les qubits sont au nombre de $n = 53$, disposés suivant un réseau $2D$, et la dimension de l'espace de Hilbert des qubits est $2^n \approx 10^{16}$. Dans une simulation complète, le nombre maximum de portes à un qubit est de ~ 1100 , celui de portes à deux qubits de ~ 400 . Le calcul procède par cycles successifs (fig. 2) et le nombre de cycles est au maximum $m = 20$. Les portes à un qubit sont contrôlées par des impulsions électromagnétiques d'une durée de l'ordre de 25 ns, tandis que les portes à deux qubits ont une durée d'activation d'environ 12 ns. On peut donc réaliser une simulation complète en un temps de l'ordre de la microseconde, et en pratique 10^6 simulations sont effectuées en 200 s, ce qui permet un excellent échantillonnage de la distribution de probabilité des qubits mesurés.

Pour effectuer une simulation, on part d'un état initial $|\varphi\rangle$ des n qubits, on applique une transformation aléatoire unitaire U réalisée physiquement par la configuration

des portes quantiques choisie pour cette simulation particulière, et les qubits dans la configuration $U|\varphi\rangle$ sont mesurés dans la base $\{|0\rangle, |1\rangle\}$. Le résultat de la simulation numéro i est une chaîne de bits $x_i = \{y_1, y_2, \dots, y_n\} \in \{0, 1\}^*$, où $\{0, 1\}^*$ désigne l'ensemble des chaînes de n bits. Une propriété des circuits aléatoires est que certaines chaînes de bits sont beaucoup plus probables que d'autres dans une simulation donnée, au lieu d'être distribuées uniformément. En effet, ces circuits fabriquent des états hautement intriqués, et on observe des phénomènes d'interférences qui rappellent celui de « tavelures » (*speckles*) que l'on peut voir en éclairant une surface rugueuse avec un laser. La déviation par rapport à la distribution uniforme est mesurée par l'entropie croisée :

$$\mathcal{F} = 2^n \langle \mathbf{p}(x_i) \rangle_i - 1,$$

où $\mathbf{p}(x_i)$ est la probabilité de la chaîne x_i et la moyenne est prise sur l'ensemble des chaînes. Dans le cas d'une distribution uniforme $\mathbf{p}(x_i) = 2^{-n}$, soit $\mathcal{F} = 0$. Dans le cas d'un circuit aléatoire idéal fonctionnant sans erreurs, on montre que la distribution est exponentielle et on en déduit $\mathcal{F} = 1$. Cependant, en raison du fonctionnement imparfait des portes et des erreurs de mesure, on s'attend à une valeur expérimentale $\mathcal{F} < 1$: les erreurs détruisent partiellement la cohérence et le résultat tend vers la distribution uniforme^(e). L'objectif est d'atteindre, en présence d'erreurs, une valeur de \mathcal{F} suffisamment élevée pour qu'elle ne soit pas calculable en un temps polynomial (temps variant comme un polynôme du nombre d'entrées) sur un ordinateur classique. Autrement dit, une simulation du circuit quantique par un ordinateur classique ne pourrait en aucun cas produire en un temps polynomial le degré d'intrication nécessaire pour obtenir une valeur suffisamment élevée de \mathcal{F} .

Le problème est évidemment celui du contrôle des erreurs. Étant donné que le processeur fonctionne sans code de correction d'erreurs, il n'y a aucune garantie que le résultat du calcul soit fiable : dans l'ère du NISQ se pose en général la question de la fiabilité de tout calcul quantique mené sur un processeur qui ne corrige pas les erreurs. Autrement dit, comment peut-on vérifier le résultat du calcul, ou comment peut-on s'assurer que ce qui sort de l'ordinateur quantique a quelque chose à voir avec ce que l'on attend de la théorie ? Dans le cas de l'algorithme de Shor, la vérification

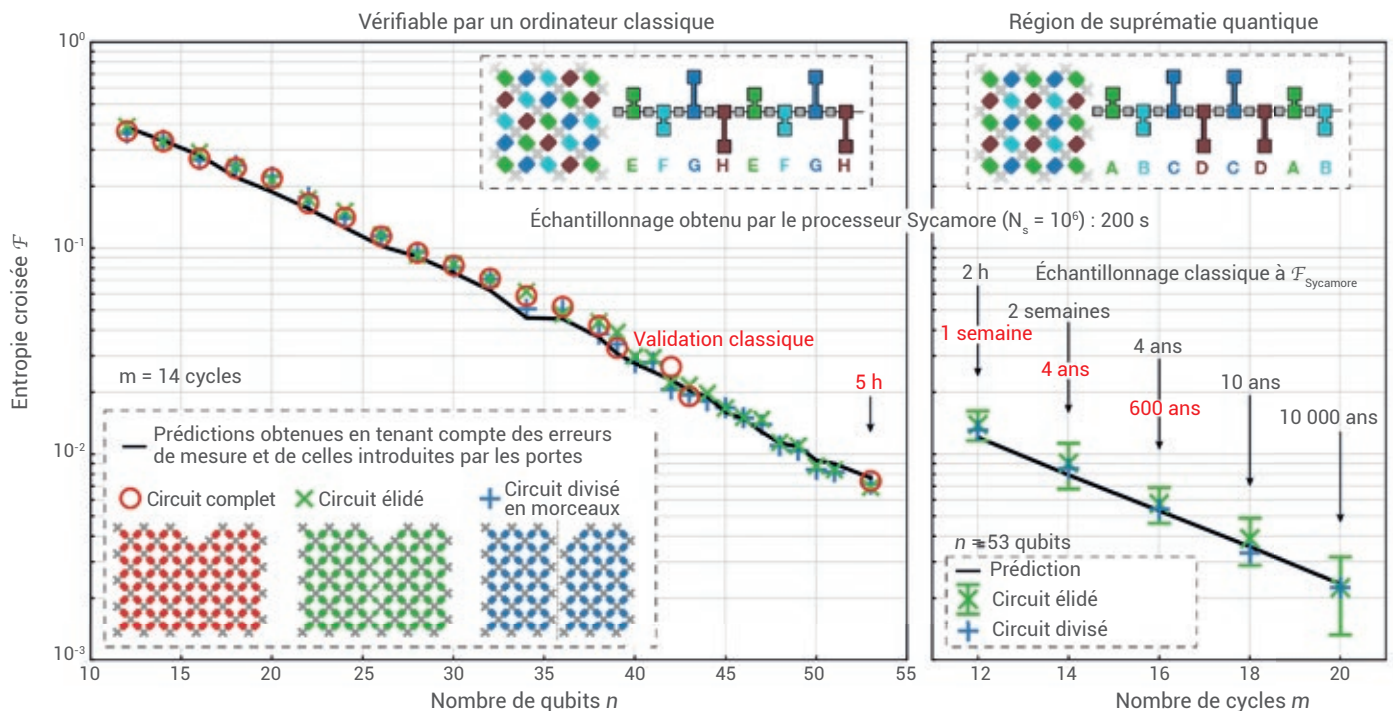
est facile : si l'ordinateur quantique nous donne les facteurs premiers p et q de N , il suffit de faire la multiplication : est-ce que $pq = N$ ou non ? Mais un processeur d'une cinquantaine de qubits fonctionnant sans erreurs permettrait au mieux de factoriser un nombre de 25 bits, et on serait très loin de la suprématie quantique, car un tel nombre serait factorisé par un ordinateur classique en une fraction de seconde !

Dans le cas présent, est-ce que mesurer une valeur élevée de \mathcal{F} reflète la réalité d'un véritable calcul quantique ou une accumulation d'erreurs sans signification ? Dans une étape préliminaire, il est indispensable d'étalonner les sources d'erreurs. De façon très schématique et pour fixer les ordres de grandeur, cet étalonnage donne une probabilité d'erreur $e_1 \approx 0,15\%$ pour les portes à un qubit, $e_2 \approx 0,6\%$ pour les portes à deux qubits et $e_3 \approx 4\%$ pour les mesures^(f). Ceci permet de modéliser \mathcal{F} comme produit des probabilités que les portes et les mesures fonctionnent sans erreur. Cette modélisation prenant en compte l'effet des erreurs est validée par des simulations classiques jusqu'à un nombre de cycles $m = 14$, avec une valeur $\mathcal{F} \approx 10^{-2}$, la durée maximale de la simulation classique étant de l'ordre de 5 heures (fig. 3). En augmentant le nombre de cycles jusqu'à $m = 20$, on obtient en 200 s la valeur $\mathcal{F} \approx (2,2 \pm 0,2) 10^{-3}$, ce qui diffère significativement de la valeur zéro. Il faudrait 10 000 ans au superordinateur classique le plus performant disponible aujourd'hui pour obtenir cette valeur. En ce sens, on a atteint la suprématie quantique.

Il est donc plausible que la suprématie quantique ait été prouvée sur cet exemple, mais on doit néanmoins souligner que le calcul quantique correspondant n'a évidemment pas le moindre intérêt pratique ! De plus, on rencontre un problème analogue à celui signalé pour l'algorithme de Shor : est-on vraiment certain d'avoir utilisé le meilleur algorithme de calcul classique ?

Une équipe d'IBM estime avoir développé un algorithme classique qui reproduirait le résultat de l'équipe de Google en deux jours et demi, et non 10 000 ans ! La question reste ouverte. Une autre objection est que simuler classiquement l'état réel obtenu par Arute *et al.*, incluant les erreurs, est bien moins exigeant en temps de calcul que simuler l'état exact, car l'espace de Hilbert des états réels est une fraction infime de l'espace de Hilbert total.

>>>



3. La suprématie quantique est-elle démontrée ? Encadrés du haut : organisation des portes. On remarque la différence de motif à droite et à gauche. Figure de gauche : évaluation de l'entropie croisée \mathcal{F} pour deux circuits simplifiés ("éladé" et "divisé") qui diminuent le temps de simulation en fonction du nombre de qubits avec un nombre de cycles $m = 14$. Les simplifications sont validées par une simulation numérique classique (cercles rouges). Les prédictions pour \mathcal{F} (trait épais noir) sont calculées à partir des erreurs mesurées. Figure de droite : pour $14 \leq m \leq 20$ et 53 qubits, le temps de calcul de la simulation classique devient prohibitif. Chiffres rouges : simulation du circuit complet. Chiffres gris : simulation du circuit simplifié.

Source : F. Arute et al., *Nature* 574 (2019) 505.

>>>

Conclusion

En conclusion, l'ordinateur quantique continue à progresser, mais on est encore très loin d'ordinateurs capables de résoudre un problème spécifique pratique comme casser le chiffrement RSA. Pour reprendre une comparaison due à Scott Aaronson : si l'on fait une analogie avec les ordinateurs classiques, nous en sommes au stade des ordinateurs à lampe de 1945. En revanche, dans les dix prochaines années, on peut s'attendre à des ordinateurs quantiques dédiés (par opposition à programmables) capables de résoudre des problèmes limités de simulation d'intérêt pratique : mise au point de médicaments, simulation de systèmes

physiques de la matière condensée, etc. On doit d'une part prendre avec prudence des annonces médiatiques souvent exagérées et, d'autre part, poursuivre la recherche fondamentale et appliquée sur les ordinateurs quantiques, car elle touche à des problèmes de physique de base sur les limites possibles de la mécanique quantique, et même des problèmes de science fondamentale : validité ou non de la thèse de Church-Turing étendue qui affirme que tout processus physique peut être simulé en temps polynomial sur une machine de Turing. Enfin, les retombées de ces recherches pourraient être tout autres que celles que nous pouvons imaginer aujourd'hui. ■

(a) Dans la version orthodoxe de la mécanique quantique, « état quantique inconnu » est un oxymore (une contradiction), car un état doit être connu de quelqu'un.

(b) Il est facile d'imaginer des états à deux qubits, par exemple $|00\rangle$ où les deux qubits sont dans l'état $|0\rangle$, ou $|11\rangle$ où les deux qubits sont dans l'état $|1\rangle$. Le principe de superposition nous dit que la superposition $a|00\rangle + b|11\rangle$, $|a|^2 + |b|^2 = 1$, représente aussi un état physique que l'on peut fabriquer au laboratoire : c'est un exemple d'état intriqué.

(c) Le couplage d'un qubit à un champ oscillant pendant une durée aléatoire permet de mettre le qubit dans l'état de superposition souhaité, par exemple de le faire passer de l'état $|0\rangle$ à l'état $|1\rangle$.

(d) Dans une expérience de fentes d'Young avec des particules quantiques, on dit souvent que « la particule est passée par les deux fentes ». Mais il s'agit d'une image, d'une interprétation, la mécanique quantique *stricto sensu* ne dit rien de tel. Dans l'interprétation de de Broglie-Bohm, qui reproduit exactement toute la mécanique quantique non relativiste, la particule passe par une seule des deux fentes.

(e) On montre que l'entropie croisée est donnée par $\mathcal{F} \approx (1 - \epsilon)^{nm}$, où ϵ est un taux d'erreur moyen de l'ordre de 1%.

(f) On obtient de meilleurs résultats en utilisant comme qubits des ions piégés, pour lesquels $\epsilon_1 \approx 0,007\%$ et $\epsilon_2 \approx 0,1\%$. Malheureusement, il est pour le moment impossible de rassembler plus d'une vingtaine de qubits de ce type dans un processeur.

En savoir plus

- 1• M. Leduc et S. Tanzilli, *Reflets de la Physique*, 51 (2016) 28-33.
- 2• K. Hartnett, « Suprématie quantique : le guide pratique », *Dossier Pour la Science* (mai-juin 2020) 8690.
- 3• K. Hartnett, « Une suprématie contestée », *Dossier Pour la Science* (mai-juin 2020) 92-95.
- 4• M. Le Bellac, *A Short Introduction to Quantum Information and Computation*, Cambridge University Press (2007)
- 5• T. Meunier, « La course aux qubits », *Dossier Pour la Science* (mai-juin 2020) 78-84.

Sciences | Médias

Femmes scientifiques à la Une !
Comment améliorer la représentation des femmes
scientifiques dans les médias ?

Journée de conférences et débats



Événement
soutenu par



MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR,
DE LA RECHERCHE
ET DE L'INNOVATION

EN
PRÉSENTIEL
ET WEBINAIRE

29 janvier 2021
Bibliothèque nationale de France - Paris



#scmedias

Inscription gratuite et obligatoire sur

www.sciencesetmedias.org

Le Square Kilometre Array (SKA) : un radiotélescope géant pour étudier l'aube et l'évolution du cosmos

Chiara Ferrari (chiara.ferrari@oca.eu)

Astronome à l'Observatoire de la Côte d'Azur - Directrice de la Maison SKA-France
OCA, Boulevard de l'Observatoire, 06304 Nice Cedex 4

La radioastronomie à basse fréquence vit aujourd'hui sa renaissance à travers la construction du Square Kilometre Array (SKA). Deux réseaux de milliers d'antennes, opérant dans les domaines de longueur d'onde métriques et centimétriques, permettront de cartographier les différentes phases de l'histoire de l'Univers, de l'apparition des premières sources lumineuses jusqu'aux systèmes d'étoiles évolués que nous observons aujourd'hui.

Mais SKA n'est pas seulement un grand observatoire astronomique : il s'agit d'un projet international qui fait face à des défis considérables, en bénéficiant de la plus grande variété de cultures et de compétences du monde entier.

Un projet global

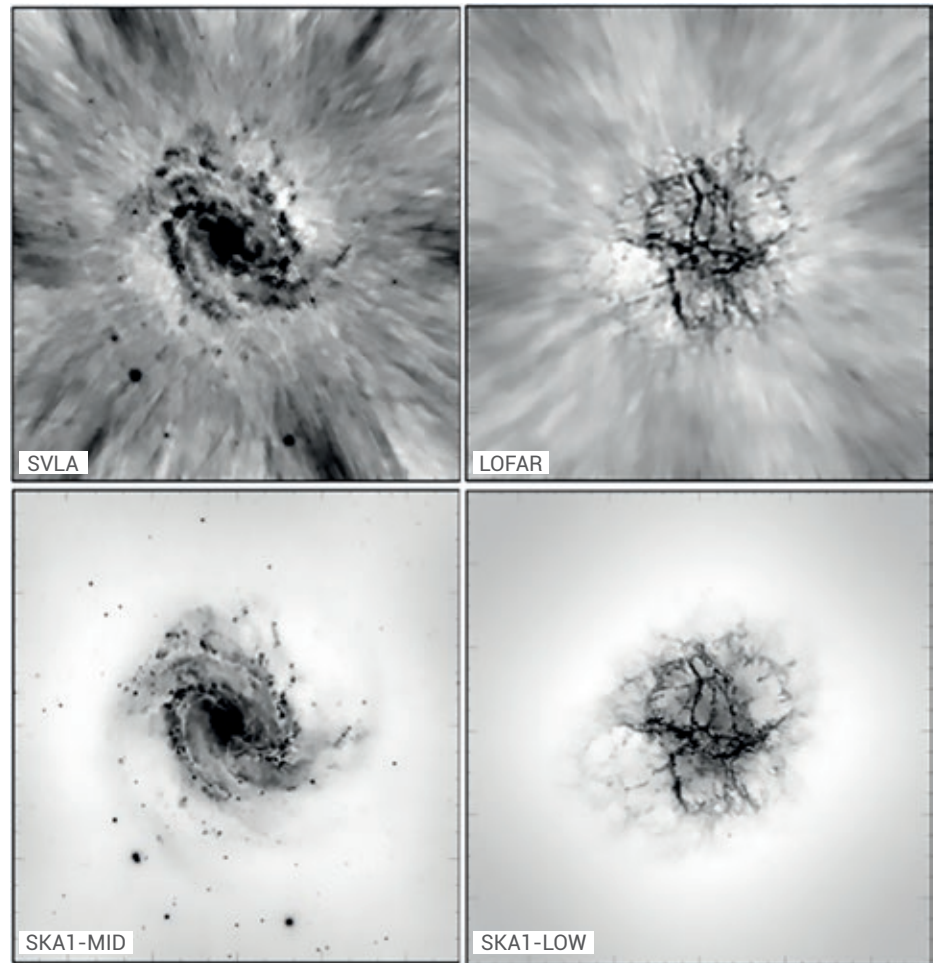
Le Square Kilometre Array (SKA), réseau interférométrique qui observera le ciel radio dans les bandes métriques à centimétriques, est l'un des projets majeurs de l'astronomie au sol au niveau mondial. Sa conception originale remonte au tout début des années 1990. C'est à cette époque qu'est née l'idée de construire un télescope capable de mesurer l'évolution du contenu en gaz d'hydrogène atomique neutre (HI) des galaxies au cours de l'histoire de l'Univers. L'observatoire astronomique en question devait forcément être un radiotélescope, les grands nuages d'HI produisant un rayonnement électromagnétique à la longueur d'onde de 21 cm. Depuis son début, le concept de SKA repose sur un réseau d'antennes de taille très importante (de surface collectrice totale d'un kilomètre carré, d'où son nom), car sa capacité à détecter des objets extrêmement faibles et à les séparer spatialement entre eux dépend respectivement de la surface collectrice totale des antennes et de leur distance maximale.

SKA est un projet global nécessitant des efforts conjoints au niveau mondial. Aujourd'hui, il s'agit d'un projet planétaire^(a), dont la construction sera lancée en 2021 et qui sera piloté par une organisation intergouvernementale. Au-delà de l'étude du gaz d'HI dans les galaxies, SKA ouvrira l'observation radio sur de vastes domaines de l'astrophysique, de la cosmologie et de la physique fondamentale : l'aube du cosmos, les sources radio transitoires, les objets compacts, les champs magnétiques, les études

planétaires, la détection, le suivi électromagnétique d'ondes gravitationnelles... et, surtout, la recherche de l'inconnu. Sur certaines thématiques, cet instrument sera le seul capable de progrès décisifs ; il apportera sur d'autres des informations complémentaires indispensables à de grands observatoires modernes, couvrant des domaines de fréquence différents du spectre électromagnétique.

Deux télescopes pour un observatoire

Depuis le début, SKA a été conçu pour ouvrir un espace de découverte unique au travers de la combinaison de caractéristiques (sensibilité, champ de vue, résolution, couverture en fréquence) qui seront, dans la plupart des cas, d'un ordre de grandeur supérieur à celles des instruments radio à basse et moyenne fréquence existants^(b). Une capacité sans égale d'obtenir des images très nettes avec des temps de pose assez courts (fig. 1) permettra à ce nouvel observatoire de balayer le ciel rapidement et en profondeur. Les grands projets d'observation du ciel qui sont en train d'être conçus avec SKA sont sensés former une « pyramide », allant d'un relevé moins profond de tout le ciel observable depuis l'hémisphère Sud (environ 31 000 degrés carrés) à des régions observées de surface de plus en plus réduite, mais avec une sensibilité croissante. Même pour le relevé le moins profond et le plus étendu, SKA va atteindre les mêmes limites de sensibilité



1. Simulations d'observations d'objets complexes : la galaxie spirale M83 dans la colonne de gauche et la nébuleuse du Crabe – reste de supernova résultant de l'explosion d'une étoile massive – à droite. Les performances en termes d'images brutes attendues par deux télescopes qui sont l'état de l'art aujourd'hui sont illustrées en haut (JVLA à gauche, LOFAR à droite). Dans le cas de SKA1-MID (gauche) et de SKA1-LOW (droite) elles sont montrées en bas. Il s'agit de simulations d'observations très rapides (de l'ordre de quelques minutes) de ces objets célestes dans une bande de fréquence de 40 MHz centrée autour de 1,4 GHz (gauche) et 140 MHz (droite).
D'après R. Braun *et al.*, « Anticipated SKA1 Science Performance », SKA-TEL-SKO-0000818 (2017).

que les instruments actuels obtiennent sur des champs de vue bien inférieurs au degré carré !

Pour atteindre ces performances, l'observatoire SKA sera initialement constitué par deux réseaux d'antennes assez différents en fonction de la bande de longueur d'onde observée (fig. 2). Un peu moins de 200 paraboles de 15 m, avec une couverture en fréquence entre 350 MHz et 15,5 GHz (SKA1-MID), seront installées dans les déserts du Karoo (Afrique du Sud). En revanche, les fréquences entre 50 et 350 MHz (SKA1-LOW) seront observées par un peu plus de 131 000 antennes log-périodiques localisées dans le désert de Murchinson (Australie). Ces antennes, similaires aux antennes de télévision en étant constituées de dipôles demi-longueur d'onde de différentes dimensions espacés le long d'une structure de support, seront regroupées en 512 stations. SKA1-LOW se base sur le concept de « réseau d'ouverture », car les signaux des 256 antennes à l'intérieur de chaque station seront d'abord déphasés et additionnés entre eux pour former un ou plusieurs faisceaux par station, ce qui justifie l'appellation « *Software Telescopes* » pour ce type d'instrument. La distance maximale entre les antennes sera de 150 km pour SKA1-MID et de 65 km pour SKA1-LOW.

Après un certain nombre de prétraitements, les énormes taux de données (des milliers de milliards d'octets par seconde) en provenance de toutes les paraboles de SKA1-MID, ou stations dans le cas de

SKA1-LOW, seront combinés soit pour créer de grandes images multifréquences du ciel (au travers de la combinaison interférométrique des signaux^(c)), soit pour enregistrer les variations d'intensité en fonction du temps et de la fréquence des signaux radio en provenance de centaines de régions du ciel simultanément (addition phasée des signaux). Il faut souligner que le traitement des données de SKA nécessitera des puissances de calcul de l'ordre de centaines de pétaFLOPS (*i.e.* environ 10^{17} opérations par seconde).

Au-delà des détails techniques concernant les observations radio [1], il est intéressant de comprendre pourquoi des capteurs si différents seront utilisés dans le cas de SKA. Aux plus basses fréquences, un des grands avantages d'utiliser des réseaux est que leur

ouverture efficace est proportionnelle à $N_A \lambda^2$ (où N_A est le nombre total d'antennes et λ la longueur d'onde d'observation). Avec le nombre important d'antennes simples que nous pouvons installer à un coût raisonnable, l'utilisation de cette technologie aux longueurs d'ondes métriques assure donc une ouverture efficace très élevée et, par conséquent, une grande sensibilité. Dans ce régime de fréquence, un ensemble d'antennes paraboliques, chacune avec une ouverture efficace proportionnelle à sa surface géométrique, ne pourrait jamais entrer en compétition. La réciproque est applicable à des fréquences plus élevées : à partir de plusieurs centaines de MHz, cela nécessiterait des réseaux d'ouverture avec une densité d'antennes tellement élevée que cette solution aurait des coûts de

>>>



2. Impression d'artiste des paraboles de SKA-MID en Afrique du Sud (à gauche) et des antennes de SKA-LOW en Australie (à droite).

fabrication et de fonctionnement (liés en particulier à la consommation d'énergie et à la capacité de calcul) qui sont aujourd'hui prohibitifs pour la communauté scientifique. C'est pour cette raison que SKA1-MID sera constitué par un réseau de paraboles qui, à partir des années 1960, ont été le type d'antennes le plus utilisé en radioastronomie à haute et moyenne fréquence.

Des radiotélescopes qui permettent de se préparer à SKA sont opérationnels aujourd'hui, aussi bien sur ses sites futurs (appelés dans ce cas « précurseurs ») qu'ailleurs (définis alors comme « éclaireurs »). En France, une station de LOFAR (éclairateur européen de SKA1-LOW) et l'éclairateur français NenuFAR (opérant entre 10 et 85 MHz) sont installés à la Station de Radioastronomie de Nançay.

Des observables uniques pour explorer le cosmos

Parmi tous les sujets qui pourront être abordés par SKA, et dont une vision d'ensemble est disponible au travers de l'ouvrage *Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array*^(d), nous présentons dans la suite quelques applications pour lesquelles cet observatoire sera un instrument clé.

Les gaz atomiques d'hydrogène neutre

Depuis les années 1950, les astronomes ont pu commencer à observer le gaz diffus composé d'hydrogène atomique neutre. Comme prévu théoriquement en 1945 par l'astronome néerlandais Van de Hulst, la

transition atomique entre les deux sous-niveaux de la structure hyperfine du niveau fondamental de l'atome d'hydrogène est en effet responsable de l'émission de photons à une fréquence (longueur d'onde) de 1420 MHz (21 cm). SKA, qui pourra mener différents types d'études sur l'émission de la raie d'HI dans les galaxies (e.g. [2], [3]), est attendu dans le domaine cosmologique, surtout pour sa capacité à étudier la distribution du gaz d'hydrogène atomique au cours de l'époque de formation des premiers objets lumineux de l'Univers, dont nous allons résumer les principales étapes.

Environ 380 000 ans après le Big Bang, l'expansion cosmique avait suffisamment refroidi l'Univers pour que les électrons et les protons primordiaux forment des atomes neutres (la « recombinaison ») et que la lumière du fond diffus cosmologique puisse se propager et être détectée par des instruments submillimétriques (e.g. le satellite Planck de l'ESA [4]). L'Univers était alors plongé dans l'obscurité, car aucune source lumineuse ne s'était encore formée. Au cours de ces « âges sombres », la gravité amplifia les petites fluctuations de densité primordiales, essentiellement de la matière noire, qui ont été observées dans le fond diffus cosmologique, et provoqua l'effondrement des nuages de gaz d'hydrogène neutre dans ces halos noirs. Quand l'Univers était âgé d'un peu moins de 200 millions d'années, les régions les plus denses formèrent finalement les premières étoiles et galaxies. Leur lumière ultraviolette ionisa le gaz neutre restant et, environ un milliard

d'années après le Big Bang, suffisamment de sources lumineuses s'étaient formées pour que l'hydrogène intergalactique soit totalement ionisé, en marquant la fin de cette époque dite de la « réionisation ».

En raison de l'expansion cosmique et donc de « l'étirement » de la longueur d'onde de la lumière durant son trajet vers nous, les photons émis à 21 cm pendant cette phase de vie de l'Univers possèdent aujourd'hui une longueur d'onde d'autant plus grande qu'ils ont été émis tôt, variant entre environ 4 et 1,5 m (entre le début et la fin de l'époque de la réionisation). Des sources radio d'avant-plan contamineront ces signaux cosmiques, mais elles pourront être filtrées grâce au fait que, contrairement au signal de la réionisation, leur flux lumineux ne change pas rapidement en fonction de la longueur d'onde.

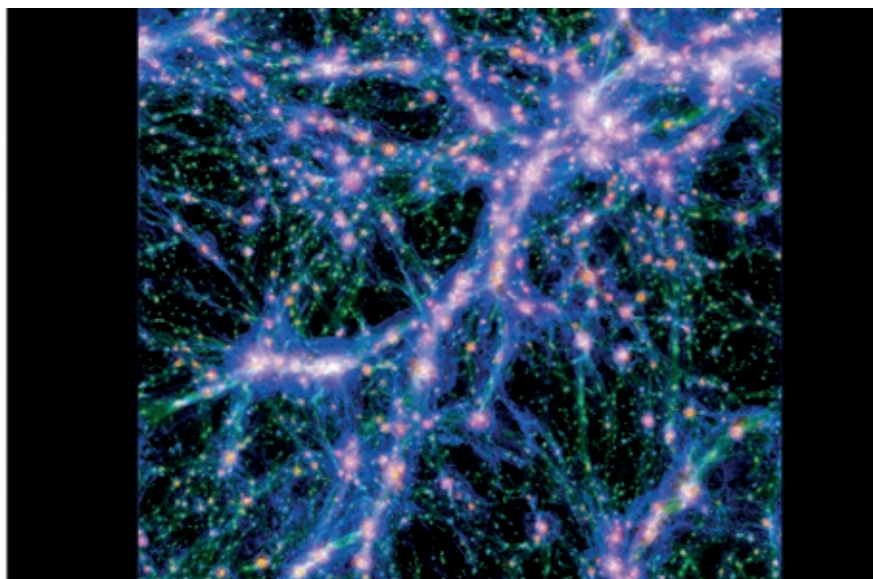
Au travers de sa sensibilité et de sa couverture spectrale, SKA sera le premier instrument capable de cartographier la distribution du gaz d'hydrogène tout au long de l'époque de la réionisation et dans les phases finales d'effondrement des nuages de gaz avant la naissance des astres, en nous donnant des contraintes uniques sur l'histoire globale de la formation des structures [5].

Le magnétisme cosmique

Le rayonnement synchrotron, engendré par des électrons relativistes décrivant un mouvement de spirale autour des lignes de champ magnétique, est d'importance particulière dans de nombreux domaines de l'astronomie. En bande radio, il est par

exemple responsable de la plus grande part de l'émission radio des noyaux galactiques actifs et, au-dessous de 30 GHz, il domine l'émission radio des galaxies qui forment des étoiles avec un taux similaire à celui de notre Voie lactée. En plus de nous permettre d'identifier la présence d'électrons de très haute énergie et d'étudier l'origine physique de leur accélération (phénomènes explosifs, supernovae, éjections de matière par des trous noirs actifs, chocs...), l'observation du rayonnement synchrotron en bande radio est un outil très puissant pour étudier le magnétisme cosmique, grâce en particulier à sa polarisation linéaire. Nous savons en effet que, quand ce rayonnement traverse un milieu magnétisé, sa direction de polarisation subit une rotation à cause de l'effet Faraday. L'angle de rotation est proportionnel à l'intensité du champ magnétique traversé ou, pour être plus précis, à sa composante le long de la direction de propagation de la lumière. Puisque des observations radio à plusieurs fréquences nous permettent de mesurer l'angle de rotation du signal polarisé, nous pouvons en déduire des informations sur le champ magnétique qui remplit l'espace traversé par la radiation. SKA augmentera d'au moins un facteur 300 le nombre de sources synchrotron connues au travers desquelles effectuer des mesures de rotation. Nous pourrions alors cartographier de plus en plus finement la distribution des champs magnétiques dans l'Univers.

La présence de champs magnétiques caractérise en effet tous les objets du cosmos : les planètes, les étoiles, les nébuleuses gazeuses des milieux interstellaires et intergalactique, jusqu'aux amas de galaxies. Grâce à une découverte récente et en accord avec les prévisions des simulations numériques [6], nous savons aujourd'hui que même les filaments très raréfiés de la « toile cosmique » (terme qui décrit la topologie de la distribution à grande échelle de la matière dans l'Univers, voir la figure 3) sont faiblement magnétisés, avec une intensité de quelques centaines de milliardième du champ magnétique terrestre. Par ailleurs, les objets célestes peuvent aussi atteindre des niveaux d'aimantation extrêmement élevés, comme dans le cas des pulsars, des étoiles à neutrons qui feront l'objet d'études approfondies avec SKA et qui sont caractérisées par des champs magnétiques des millions de millions de fois plus intenses que celui de la Terre [7].



3. Simulation numérique dans une boîte cubique de (100 Mparsec)³, reproduisant les émissions X et radio attendues de la structure à grande échelle de l'Univers. La couleur orange correspond au rayonnement de freinage thermique émis en bande X par le gaz chaud et diffus dans les filaments de la toile cosmique et, surtout, dans les amas de galaxies localisés aux croisements de ces filaments. La couleur bleue est associée au rayonnement synchrotron en bande radio engendré par les électrons relativistes dans les champs magnétiques, dont la distribution est représentée en vert.

Adapté de F. Vazza et al., "Detecting shocked intergalactic gas with X-ray and radio observations", *A&A* 627 (2019) 5.

Les recherches visant à comprendre l'origine et l'évolution du magnétisme cosmique sont de très grande actualité. Par exemple, les astronomes s'interrogent sur le rôle indéniable que ces champs doivent jouer dans l'évolution de la matière interstellaire, en sachant qu'il sera impossible de comprendre finement la formation des étoiles et des planètes sans en tenir compte.

Vers l'inconnu : l'exemple des sursauts radio rapides

Tous les astronomes explorent l'Univers en espérant tomber un jour sur de « l'inconnu ». C'est ce qui est arrivé en 2007 à D. Lorimer qui, en réexaminant des données de 2001 du radiotélescope de Parkes (antenne de 64 m en Australie), découvrit un nouveau type de source radio transitoire : un sursaut d'émission radio très intense et de durée inférieure à quelques millièmes de seconde. Ce type de source, qui peut émettre en ces intervalles de temps très courts plus d'énergie que le Soleil en 80 ans, fut baptisé « sursaut radio rapide » ou « *fast radio burst* » (*FRB*) en anglais. Depuis, plus de cent nouveaux *FRB* ont été annoncés^(e), parmi lesquels plus de la moitié l'ont été au cours des deux dernières années grâce à deux télescopes construits pour préparer la voie à SKA. Le premier est ASKAP, en Australie,

opérant entre 700 et 1800 MHz et capable non seulement de détecter efficacement les *FRB*, mais aussi d'en dériver la position dans le ciel avec une précision très élevée. Le second est CHIME, au Canada, premier instrument basse fréquence (400-800 MHz), qui a capté des *FRB* alors qu'il n'était encore qu'en phase de mise en service.

Il reste encore à éclaircir l'existence de deux différentes classes de sursauts radio rapides : ceux récurrents et ceux qui ne se répètent jamais. Le fait de ne pas réobserver certaines sources pourrait être lié à des variations de la luminosité radio émise au cours du temps. Mais il est aussi tout à fait possible que différentes classes de *FRB* existent, selon plusieurs phénomènes physiques plus ou moins exotiques qui pourraient être associés à l'interaction, à la coalescence ou à l'effondrement d'objets compacts, aux restes de supernovae, aux noyaux galactiques actifs, ou encore aux hypothétiques cordes cosmiques.

Les observations indiquent que tous les *FRB* connus^(f) (sauf un, comme on le verra) sont d'origine extragalactique. Un délai est observé entre les temps d'arrivée des différentes composantes en fréquence du sursaut, les photons moins énergétiques arrivant après ceux émis aux fréquences plus élevées. Ce délai, appelé « mesure de

>>>

>>>

dispersion », produit lorsque les ondes électromagnétiques traversent le plasma cosmique, est un indicateur direct du nombre d'électrons libres par unité de surface entre l'observateur et la source qui a émis le *FRB*. Les dispersions importantes mesurées pour les sursauts observés indiquent qu'ils ont traversé trop de matière pour se trouver à l'intérieur de notre Galaxie. La localisation, à ce jour, de six *FRB* dans des galaxies à des distances de plusieurs milliards d'années-lumière confirme l'hypothèse extragalactique. Parmi ces six objets, l'un est un *FRB* récurrent qui se trouve dans une galaxie naine avec un taux de formation stellaire important ; en revanche, il n'y a pas eu de répétitions observées des autres *FRB* qui se trouvent dans des galaxies plus massives, mais avec des taux de formation stellaire significativement plus faibles.

Les propriétés de ces galaxies suggèrent que les sources hypothétiques des sursauts radio rapides sont des « magnétars », étoiles à neutrons disposant d'un champ magnétique extrêmement intense. L'origine physique des magnétars est à son tour à l'étude, et plusieurs théories ont été proposées. En mettant ensemble tous les morceaux du puzzle, on pense aujourd'hui que les magnétars associés aux *FRB* qui se répètent ou pas pourraient résulter d'explosions de supernovae avec des énergétiques différentes, supralumineuses dans un cas, standard dans l'autre. En accord avec

l'hypothétique association entre *FRB* et magnétars, une équipe de chercheurs a annoncé en mai 2020 l'observation d'un premier candidat de *FRB* galactique associé à un sursaut d'émission en rayons X en provenance d'une source connue de rayons gamma. L'hypothèse la plus probable qui expliquerait ces propriétés multi-longueurs d'onde est que ce candidat *FRB* soit produit par un magnétar dans notre Galaxie.

Il est important cependant de souligner que d'autres hypothèses sur les sources d'émission des *FRB* restent tout à fait ouvertes, en particulier l'effondrement et la coalescence d'objets compacts dans le cas des sources non récurrentes, ainsi que des systèmes binaires dans le cas des *FRB* qui se répètent. SKA prévoit d'observer des milliers de sursauts radio rapides.

Ainsi, les astronomes pourront non seulement identifier la (ou les) mystérieuse(s) origine(s) physique(s) des *FRB*, mais aussi, au travers de la mesure de dispersion, utiliser ces derniers pour cartographier la distribution du gaz dans les halos des galaxies [8] ou dans l'espace intergalactique. À ce propos, l'équipe de "*FRB hunters*" d'ASKAP dirigée par J.-P. Macquart a publié en mai 2020 un résultat très marquant, en obtenant pour la première fois une mesure de la densité de matière ordinaire dans l'Univers, qui est en accord parfait avec les prévisions cosmologiques.

Conclusion

La communauté des astronomes et astrophysiciens attend avec impatience le début de la construction du Square Kilometre Array, un des principaux observatoires astronomiques mondiaux des cinquante prochaines années. La réalisation des deux radiotélescopes qui en constitueront la première phase a nécessité d'atteindre un niveau technologique très élevé dans plusieurs domaines clés (traitement du signal, électronique numérique, réseaux à haut débit, systèmes de calcul haute performance...), ce qui explique pourquoi cet instrument, dont les radioastronomes ont commencé à rêver il y a plus de 25 ans, ne peut être réalisé que maintenant.

Au rang des défis à relever, qui doivent également être vus comme des motivations supplémentaires pour s'y engager et qui dépassent les frontières de la recherche en astronomie, on peut citer la quantité de données et de calcul, la nécessité impérieuse de réduire la consommation énergétique et de proposer des solutions d'énergie renouvelable.

L'échelle planétaire de SKA est aussi un enjeu de taille, avec des acteurs du monde entier qui se sont engagés dans sa construction et dans l'exploitation d'un ambitieux projet, qui doit prendre en compte la gestion de problèmes intéressants de coopération internationale et multiculturelle. ■

Références

- 1• P. Zarka *et al.*, *Radioastronomie basses fréquences*, École thématique du CNRS, Goutelas, Loire (2007).
- 2• F. Combes, *La matière noire dans l'Univers*, Collège de France / Fayard (2015).
F. Combes, « La matière noire, une sombre affaire », *Reflets de la physique* **51** (2016) 4-10.
- 3• C. Pichon et T. Sousbie, « Cartographier l'Univers », *Dossier Pour la Science*, **71** (avril-juin 2011).
- 4• N. Aghanim et H. Dole, « Les résultats cosmologiques de la mission Planck », *Reflets de la physique* **64** (2020) 4-10.
- 5• A. Loeb, « L'Univers à l'âge des ténèbres », *Dossier Pour la Science*, **71** (avril-juin 2011).
- 6• Communiqué de presse de l'Observatoire de la Côte d'Azur : <https://cutt.ly/oca-eu-aurorecosmique-eclaire-la-connexion-entre-deux-amas-de-galaxies>
- 7• I. Cognard, « Les pulsars radio : 50 ans de découvertes ! », *Reflets de la Physique*, **59** (2018) 26-31.
- 8• Communiqué de presse de l'ESO : www.eso.org/public/france/news/eso1915/?lang

(a) Liste des pays et instituts participant à sa construction : www.skatelescope.org

(b) Cf. le tableau 1 dans P. Dewdney *et al.*, "SKA1 System Baseline V2", SKA-TEL-SKO-0000002 (2016). À noter que le grand radiotélescope international ALMA n'est pas inclus dans ce tableau, car il est complémentaire à SKA en termes de couverture du spectre électromagnétique. ALMA capte en effet des ondes de fréquences plus élevées (35-950 GHz).

(c) Un interféromètre étant constitué par un nombre d'antennes limité et une surface de récolte de la lumière non continue, après avoir corrélé les signaux captés par chaque couple d'antennes, nous ne disposons que d'échantillons de la transformée de Fourier de l'intensité observée du ciel. Un ensemble d'opérations mathématiques doit ainsi être effectué afin d'obtenir une image du ciel.

(d) Une version électronique des deux volumes est disponible à l'adresse : <https://cutt.ly/SKA>.

(e) Une liste des *FRB* découverts et de leurs propriétés est disponible à l'adresse : www.frbcat.org

(f) Une liste est mise à jour régulièrement à l'adresse : https://frbtheorycat.org/index.php/Main_Page

Détecter l'état électronique d'un atome en mesurant sa masse

Extrait de l'actualité scientifique de l'Institut de physique du CNRS du 22 juin 2020

L'équivalence entre masse et énergie est bien connue par la célèbre relation d'Einstein $E = mc^2$. En associant les mesures de masse les plus précises et les calculs quantiques et relativistes d'énergies de liaison électroniques les plus récents, des physiciennes et des physiciens ont pour la première fois identifié un état électronique excité en mesurant la différence entre la masse de l'atome excité et la masse de l'atome dans son état fondamental pour un atome de rhénium chargé 29 fois.

Pour étudier les propriétés des atomes chargés, les ions, il est nécessaire de les piéger suffisamment longtemps et, pour cela, on utilise des champs électriques et magnétiques. Dans les pièges de Penning, un champ magnétique de plusieurs teslas contribue, avec un champ électrique statique, au confinement des ions en les faisant tourner autour des lignes de champ. La fréquence de rotation des ions – la fréquence cyclotron – est d'autant plus grande que leur masse est petite et, dans les pièges les plus avancés, sa mesure donne accès à des valeurs de masse ultra précises. L'existence de la relation d'Einstein entre masse et énergie permet de comprendre que de telles mesures sont des voies pour avancer dans la connaissance des interactions entre les particules constitutives des atomes. En particulier, dans le cas des ions lourds, parce que la charge du noyau est élevée, les niveaux d'énergie des électrons sont très sensibles aux termes quantiques et relativistes qui décrivent les interactions. Il est particulièrement intéressant d'étudier des ions très chargés, « épluchés » d'un grand nombre d'électrons, et dont les électrons restants sont fortement attirés par le noyau et pour cela très rapides et fortement relativistes.

Afin de sonder les interactions fondamentales à l'œuvre au sein des ions très chargés, des physiciennes et des physiciens de l'Institut Max Planck pour la physique nucléaire de Heidelberg ont développé un système à cinq pièges nommé PENTATRAP (fig. 1), qui atteint une précision record de mesure de masse avec une incertitude relative de 10^{-11} . Ils ont observé que certains ions de l'atome de rhénium chargé 29 fois, $^{187}\text{Re}^{29+}$, possédaient une masse supérieure à la masse attendue, avec une différence relative $\delta m/m$ de l'ordre de 10^{-9} , soit, de façon imagée, l'écart dû à la présence d'une fourmi sur le dos d'un éléphant. Cette augmentation de masse est provoquée par l'excitation d'un électron sur une orbite d'énergie plus élevée que celle de l'état fondamental. Différents calculs quantiques prenant en compte les corrections relativistes nécessaires pour atteindre la même précision que la mesure ont été effectués par les physiciens de l'université de Heidelberg et par un physicien du Laboratoire Kastler



© MPI pour la physique nucléaire, Heidelberg.

1. Le dispositif PENTATRAP se compose de cinq pièges dits de Penning disposés les uns au-dessus des autres (la « tour » jaune au milieu). Dans ces pièges de construction identique, les ions à l'état excité et à l'état fondamental peuvent être mesurés en comparaison. Pour minimiser les erreurs, les ions sont déplacés d'un piège à l'autre pour des mesures de comparaison.

Brossel. Ils ont permis d'identifier l'état excité comme un état métastable, d'une durée de vie exceptionnellement longue de 130 jours environ. Alors que les énergies des états excités des atomes sont le plus souvent mesurées *via* des transferts d'énergie avec des photons ou avec d'autres particules comme des électrons, il s'agit ici de la première identification d'un état excité par une « simple » mesure de masse, n'impliquant aucun changement de l'état atomique. Ces résultats sont publiés dans la revue *Nature* [1].

Ces travaux démontrent une méthode inédite pour détecter des états excités de durée de vie extrêmement longue, par ailleurs très improbables à détecter par des processus de relaxation. Ils confirment les ions très chargés comme terrain d'exploration essentiel de la physique théorique. En effet, la précision des mesures de masse permet de tester plus loin la théorie de l'électrodynamique quantique utilisée jusqu'à présent. Par ailleurs, l'observation d'un tel état atomique de grande durée de vie ayant une transition dans le domaine des rayons X mous ouvre des perspectives à long terme pour pulvériser les records actuels de précision des horloges atomiques.

[1] R. X. Schüssler et al., *Nature*, **581** (2020) 42-46.

Contact :

Paul Indelicato (paul.indelicato@lkb.upmc.fr)

La croissance des villes vue par la physique statistique

Marc Barthélémy (marc.barthelemy@ipht.fr)

Directeur de recherche à l'Institut de physique théorique, IPHT, CEA/Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex

Membre associé au Centre d'Analyse et de Mathématiques Sociales (CAMS-EHESS)

Le développement spectaculaire de l'urbanisation dans le monde s'accompagne d'un grand nombre de problèmes environnementaux et sociaux. Il est devenu essentiel de modéliser les villes, car les décideurs ont besoin de théories solides pour atténuer ces problèmes. Heureusement, la disponibilité croissante de données rend possible la construction d'une « science des villes » quantitative et la modélisation des phénomènes.

La physique statistique joue un rôle majeur dans cet effort, en apportant des outils et des concepts capables de rapprocher la théorie et les résultats empiriques. Nous illustrons ici cette approche par deux exemples : la transition vers une organisation polycentrique de l'activité d'une ville, et le CO₂ émis par les transports.

Systèmes urbains et physique

L'omniprésence des villes à différentes époques et à travers le monde suggère que leur existence a des raisons universelles. En tant que concentrations dans l'espace, elles réduisent la distance entre les individus, simplifient l'échange d'idées, de biens et de services, et enfin permettent la spécialisation et le partage des compétences et des ressources énergétiques. Cependant, les villes ont aussi des inconvénients : la localisation spatiale entraîne une augmentation des coûts de logement, la congestion du trafic, l'étalement urbain, la pollution et autres problèmes environnementaux. Atténuer ces problèmes, accompagner la croissance des villes implique une compréhension fondamentale de ces systèmes et de leur évolution. Ceci est d'autant plus vrai que les villes des pays émergents connaissent une croissance très rapide : on estime que d'ici à 2050, la population des zones urbaines augmentera de 2,5 milliards de personnes, dont 90% en Afrique et en Asie.

La plupart des études sur les villes proviennent des sciences sociales, et ce sont essentiellement les géographes et les économistes qui ont abordé les villes sous un angle quantitatif. Cependant, malgré un grand nombre d'études, il est juste de dire que nous n'avons pas encore de modèles théoriques simples et robustes pour les villes, avec des prévisions en accord avec les données empiriques. Heureusement, cette situation est sur le point de changer, grâce à la disponibilité croissante de données sur les systèmes urbains. Différents dispositifs à différentes échelles produisent une très

grande quantité de données potentiellement utiles pour construire une « nouvelle science des villes » [1-3].

La physique statistique joue naturellement un rôle important dans cet effort, en apportant des outils et concepts permettant de faire le lien entre le microscopique et les comportements émergents, entre les données et des modèles théoriques simplifiés. Le lien entre les villes et la physique remonte en fait à longtemps (voir la revue de Barthélémy [3]) avec, par exemple, la loi de Zipf qui stipule que si on classe les villes par population décroissante, alors la ville au rang r a une population $P \propto 1/r$, ou bien la loi « de gravité » donnant le nombre de déplacements N entre deux villes de populations P_1 et P_2 et séparées d'une distance d sous la forme $N \propto P_1 P_2 / d^\sigma$, où σ est un exposant positif. D'autres exemples historiques de telles connexions comprennent des modèles basés sur les fractales, ou d'agrégation, et ont été invoqués pour décrire la croissance de telles structures. Ainsi, un modèle de percolation appliqué à la croissance des villes a prédit des résultats en accord avec leur dynamique mesurée [4]. Ces modèles, très simplifiés, suggéraient déjà la pertinence possible d'approches de physique statistique simples pour des systèmes aussi complexes que les villes. Plus récemment, des liens ont été suggérés entre la croissance des villes et l'équation de diffusion avec bruit, elle-même connectée à l'équation de Kardar-Parisi-Zhang, un modèle central en physique statistique qui décrit la croissance de surfaces ou la dynamique de polymères en milieu aléatoire [5]. Enfin, un autre exemple important est celui de la modélisation de la dynamique de la ségrégation qui a débuté



© Tommie Hansen, (Wikimedia Commons)



Un exemple de ville polycentrique : vue panoramique de Bilbao dans le Pays basque en Espagne (voir la figure 1b).

dans les années 1970 avec le modèle de Schelling, un modèle de type Ising, qui a naturellement séduit les physiciens et qui possède une phénoménologie très riche.

Dans ce bref aperçu, nous allons illustrer les recherches de ce type par les exemples de la structure spatiale des villes et de l'émission de CO₂.

Polycentrisme et congestion

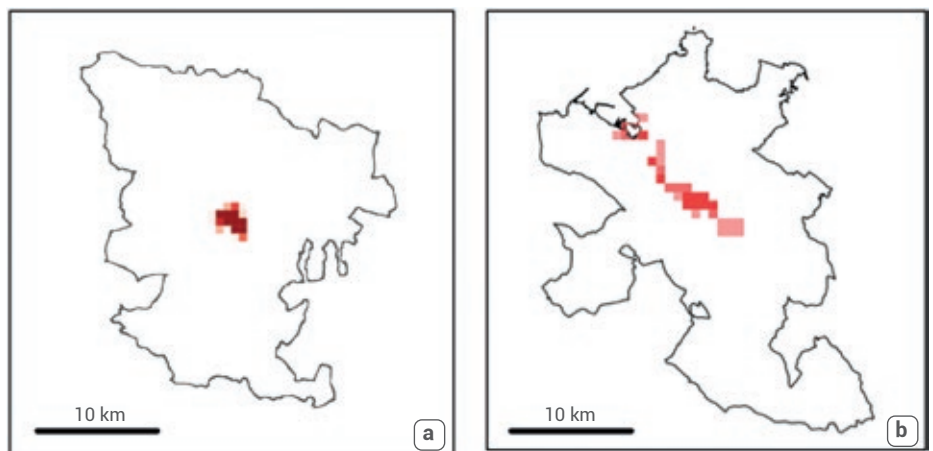
À l'aide de mesures utilisant les nouvelles sources de données telles que la téléphonie mobile ou les GPS, ou bien des sources plus classiques telles que le recensement, nous observons en général qu'il n'existe essentiellement que deux types d'organisation spatiale de l'activité dans les villes. En premier lieu, des villes généralement petites ont un centre d'activité unique (fig. 1a) et correspondent à l'image classique de la ville monocentrique organisée autour d'un quartier d'affaires central. Deuxièmement, pour les grandes villes, nous observons un schéma plus complexe (fig. 1b), avec plusieurs centres d'activité qui peuvent être plus ou

moins délocalisés selon la ville. La distribution spatiale de ces centres permet donc de distinguer différentes catégories de villes, de type monocentrique avec une concentration de l'activité, ou bien de type polycentrique pour lequel on observe une répartition en plusieurs centres d'activité. Ces différents résultats pointent vers la possibilité d'une

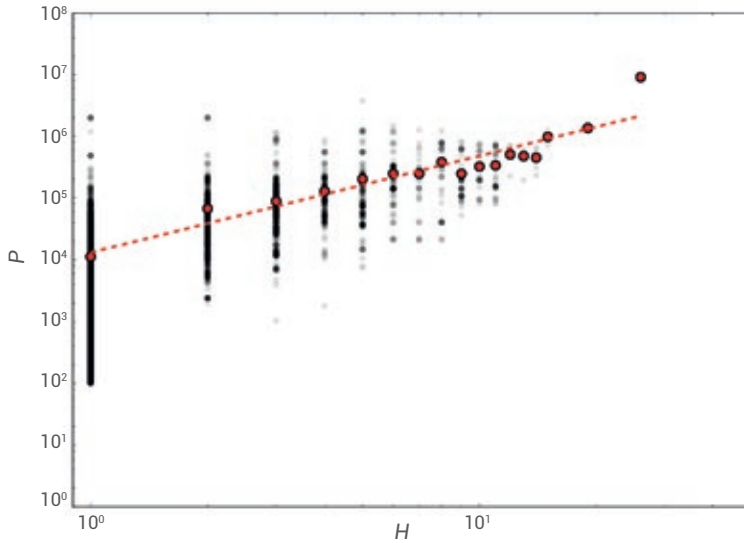
nouvelle classification quantitative des villes, en utilisant des données spatio-temporelles à haute résolution.

Afin d'aller plus loin dans l'analyse quantitative de l'organisation spatiale des activités dans les villes, nous déterminons le nombre H de centres d'activité (pour plus de détails sur cette méthode, voir Louail *et al.* [7]) et

>>>



1. Densité d'utilisateurs de téléphones mobiles pour Vitoria, 250 000 habitants (a), et Bilbao, 950 000 habitants (b). Plus la couleur est foncée et plus la densité est forte. (Figure b issue de Louail *et al.* [6]).



2. Population P en fonction du nombre H de centres d'activité pour environ 9000 villes des États-Unis ayant une population supérieure à 100 habitants. Les points rouges correspondent à la moyenne pour chaque valeur (entière) de H , et la droite en pointillés représente l'ajustement avec une pente $\delta = 1,56 \pm 0,15$ (en coordonnées logarithmiques log-log) et correspondant donc à une valeur $\beta \approx 0,64$ dans l'équation (1). (Figure de Louf et Barthélémy [8])

>>>

comment il varie avec la population P de la ville. Nous observons sur ces résultats l'existence d'un comportement robuste (confirmé par des études sur les données d'emploi pour 9000 villes américaines [8]), qui est approché par la forme continue :

$$H = [P/P^*]^\beta \quad (1)$$

pour $P > P^*$, où l'exposant β est généralement autour de 0,5 (fig. 2).

Ce résultat montre (i) que H croît avec la population P , et (ii) que cette croissance est lente et sous linéaire. Ce résultat non trivial va nous servir de guide pour la construction de modèles.

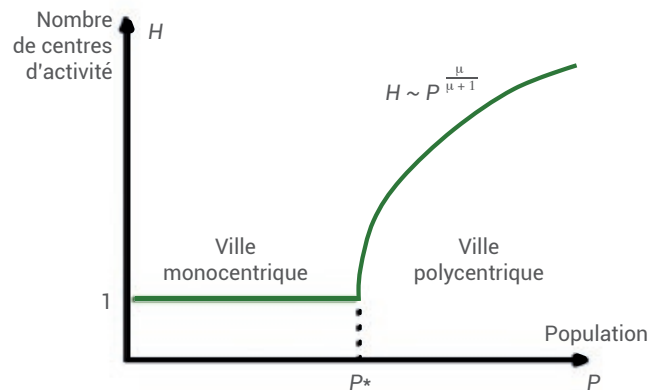
La question théorique qui se pose alors est simple : comment expliquer ce comportement observé pour la variation lente du nombre de centres d'activité quand la ville croît ? Et peut-on prédire ce comportement ? Afin de comprendre la structure spatiale des villes et le nombre de centres d'activité, nous devons essentiellement modéliser la manière dont un agent choisit sa résidence et son lieu de travail.

Une approche théorique importante pour comprendre ce problème a été proposée par les économistes japonais Fujita et Ogawa en 1982 [9]. Dans ce modèle, les agents optimisent leur utilité et les entreprises leur profit. Ainsi, un agent va choisir son lieu de résidence et son lieu de travail afin que son salaire diminué de son loyer et des

coûts de transport soit maximum. Dans ce modèle, Fujita et Ogawa choisissent d'ignorer les effets de congestion en prenant des coûts de transport proportionnels à la distance entre les lieux de résidence et de travail. Avec ce modèle – très complexe, car tout est endogène ici – Fujita et Ogawa ont pu montrer que l'organisation monocentrique avec un centre d'activité unique est instable, en particulier lorsque les coûts de transport deviennent trop élevés. Ce formalisme ne permet cependant pas de prédire le nombre de centres d'activité

lorsque la population augmente. Même si ce modèle est satisfaisant d'un point de vue intellectuel, tant que ses prédictions ne sont pas en accord avec des mesures empiriques, nous ne pouvons que placer un faible niveau de confiance dans sa capacité à décrire ce qui se passe réellement dans les villes.

Afin d'aller plus loin, nous exposons ici brièvement une nouvelle façon de modéliser les villes, en intégrant des ingrédients de l'économie urbaine et des outils de la physique statistique [8, 10]. Un premier point important ici est que, contrairement à Fujita et Ogawa, nous allons inclure la congestion du trafic automobile. L'effet de la congestion sur le temps passé pour aller d'un point à un autre est central en économie des transports et décrit de manière effective les interactions entre individus. En l'absence de congestion, le temps nécessaire pour aller en voiture d'un point à un autre est proportionnel à la distance entre ces points et fait intervenir la vitesse moyenne sur le système routier. En revanche, lorsque le système routier a une capacité finie (en nombre de véhicules par heure, par exemple), le temps mis pour parcourir une même distance va dépendre du trafic et traduit l'effet de la congestion. Une seconde approximation fondamentale consiste à considérer que le revenu d'un individu, quantité complexe résultant d'un grand nombre d'interactions, est trop compliqué à décrire précisément et qu'il faut le remplacer par une variable aléatoire gelée, approximation typique de la physique (par exemple dans le travail pionnier sur les



3. Prédiction du modèle de villes incluant la congestion : nombre de centres d'activité H en fonction de la population P . Pour une population inférieure au seuil ($P < P^*$), le système est monocentrique ($H = 1$). Au-dessus de P^* , la congestion (caractérisée par le paramètre μ) impose la dispersion de l'activité sur plusieurs centres, dont le nombre croît de manière sous linéaire avec la population.

niveaux d'énergie des systèmes complexes de Wigner [11]). En mettant tous ces ingrédients ensemble, l'étude mathématique (et numérique) permet de prédire que dans le cadre de ce modèle la ville monocentrique est stable jusqu'à un seuil de population P^* , au-dessus duquel un autre centre d'activité devient plus intéressant pour les individus (fig. 3). Nous sommes en présence d'une transition, phénomène central en physique statistique.

Le découpage spatial de l'activité dans les villes est donc ici contrôlé par la congestion : lorsque la ville est suffisamment petite, tous les individus choisissent d'aller au centre le plus attractif (du point de vue du salaire), mais cela augmente le coût de transport (dû à l'effet de congestion). Un autre centre, moins attractif mais avec un trafic plus faible, devient alors à partir d'un moment le lieu de travail le plus intéressant. Nous pouvons estimer ce seuil et montrer analytiquement que l'augmentation de la population conduit à une augmentation sous linéaire du nombre de centres d'activités, en accord avec les observations empiriques décrites ci-dessus (équation (1)). La congestion du trafic automobile n'est certainement pas le seul facteur de formation des différents centres d'activités et de la structure polycentrique des grandes villes, mais comme le montre l'accord avec les résultats empiriques, elle joue un rôle majeur.

Trafic routier et émission de CO₂

Ce type d'approche permet aussi d'intégrer d'autres modes de transport, tel que le métro par exemple, et d'estimer le nombre d'individus T qui prennent leur voiture, ainsi que la quantité de CO₂ émise par ce trafic. Dans ce modèle simplifié [12], supposons que la densité des stations dans la ville est telle que chaque individu a une probabilité p d'être à une distance inférieure à 1 km d'une station de métro. Avec une probabilité $1 - p$, l'individu est trop loin d'une station et va donc devoir prendre sa voiture. En revanche, avec une probabilité p un individu peut alors choisir entre l'automobile et le métro et va se tourner vers le mode dont le coût est le plus faible. On peut alors montrer qu'il existe une distance critique $d(T)$ qui dépend du trafic routier T et au-delà de laquelle la voiture est toujours plus intéressante que le métro. Pour une grande ville, on peut montrer que la distance $d(T)$ est supérieure à la

taille typique de la ville et on trouve alors le résultat très simple :

$T / P = 1 - p$. Cette relation, qui semble très intuitive, n'a pourtant jamais été mise en évidence auparavant et peut être testée empiriquement (fig. 4) avec les données disponibles pour vingt-cinq grandes villes dans le monde [12]. Malgré l'absence de paramètre ajustable, l'accord avec les données est très bon et démontre l'efficacité d'un modèle simplifié tel qu'on peut le construire en physique.

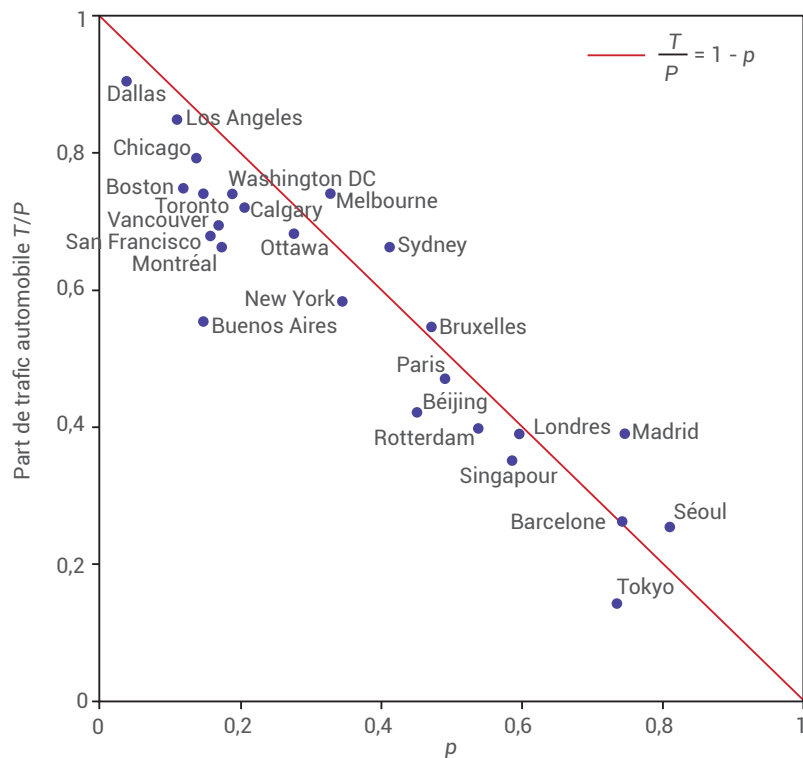
Ce modèle simple permet aussi d'estimer l'émission de CO₂ due au trafic routier dans une ville donnée en fonction de sa population P , de son aire A , des effets de congestion τ (τ mesure le pourcentage de temps moyen supplémentaire dû aux embouteillages) et du paramètre p . Ce modèle prédit que le CO₂ émis par les voitures (et de manière similaire le retard total passé dans les embouteillages) n'est pas une simple fonction de la densité urbaine, contrairement au résultat empirique et largement relayé de Newman et Kenworthy [13] qui suppose que la consommation d'essence dans une ville est une fonction décroissante de la seule densité

>>>

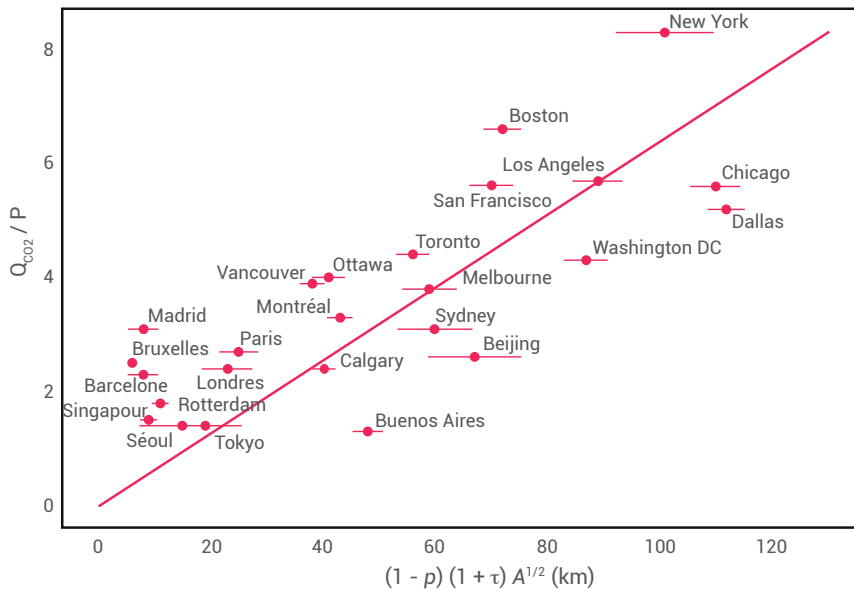
.....

« L'étude mathématique et numérique permet de prédire que [...] la ville monocentrique est stable jusqu'à un seuil de population, au-dessus duquel un autre centre d'activité devient plus intéressant pour les individus. Nous sommes en présence d'une transition, phénomène central en physique statistique. »

.....



4. Prédiction du modèle pour la part de trafic automobile T/P dans une ville de population P . La quantité p est la probabilité d'être à une distance de moins de 1 km d'une station et est une mesure de la densité du transport public. (Figure de Verbavatz et Barthelemy [12].)



5. Comparaison entre les émissions annuelles de CO₂ par habitant liées au transport dans 25 grandes villes, avec la prédiction théorique de l'équation (2). La ligne rouge est l'ajustement linéaire, avec une pente égale à 0,064 tonnes de CO₂ par km, par habitant et par an (le coefficient de corrélation de Pearson est 0,79). Les barres d'erreur sont calculées pour une erreur typique de 10% sur p et τ . (Figure de Verbavatz et Barthélémy [12])

>>>

de population. Ce résultat empirique a eu un impact crucial sur la gestion des villes, car il « prédit » qu'en augmentant la densité on diminue le trafic automobile et les problèmes qui y sont associés. En revanche, le modèle simple discuté ici montre que l'émission de CO₂ (par les transports) est donnée par la formule :

$$Q_{CO_2} \propto P(A)^{1/2} (1-p) (1+\tau) \quad (2).$$

Cette relation est testée (fig. 5) avec les mêmes données pour vingt-cinq grandes villes dans le monde [12]. L'accord est globalement correct, et l'on observe quelques grandes déviations telle que Buenos-Aires qui a un taux de motorisation très faible et donc des émissions de CO₂ plus faibles que prévu, ainsi que New York par exemple qui est l'un des plus gros émetteurs de CO₂ (dû au transport) au monde.

Ce résultat (équation 2) suggère que pour atténuer le trafic (et ses effets tels que les émissions de CO₂) il faut réduire la taille de la zone urbanisée ou, de manière plus réaliste, améliorer la densité des transports en commun ou leur accès. En revanche, si on augmente la densité de population de manière aveugle, on augmente la congestion et donc l'émission de CO₂. Augmenter la densité de population est donc une bonne idée uniquement si cela augmente également la fraction des personnes ayant accès aux transports en commun.

Discussion

La disponibilité récente de grandes quantités de données nous permet de révéler des régularités statistiques dans les villes du monde entier. Ces régularités suggèrent l'existence de mécanismes communs qui régissent la formation et l'évolution de ces systèmes, au-delà de leurs différences historiques, géographiques et culturelles. De plus, ces données permettent de tester les modèles et d'identifier les mécanismes dominants gouvernant l'évolution de ces systèmes. Alors que les économies d'agglomération semblent être le processus fondamental expliquant l'existence des villes et leur résilience spectaculaire, les résultats décrits ici montrent que la congestion est une force motrice qui disperse le modèle monocentrique et force le système urbain dans une organisation polycentrique. L'organisation spatiale de l'activité observée dans les grandes villes peut donc être comprise comme une conséquence de l'interaction entre ces processus concurrents. Même si la polycentricité apparaît ici comme une réaction des systèmes urbains permettant d'abaisser le niveau global de la congestion automobile, ces structures ne sont pas suffisantes pour abaisser à terme le temps total passé dans les embouteillages. L'interpolation naïve des mesures actuelles montre clairement que la voiture individuelle – même électrique – n'est pas une solution viable dans les zones urbaines denses, les temps de transport en voiture seraient bien trop longs.

Ces données, combinées à une approche interdisciplinaire intégrant la physique, la géographie et l'économie urbaine, permettront peut-être de poser les bases solides d'une science des villes et de proposer des solutions durables pour la croissance des systèmes urbains modernes. ■

Références

1. M. Batty, *The new science of cities*, The MIT Press. Cambridge, MA, USA (2013).
2. M. Barthélemy, *The structure and dynamics of cities*, Cambridge University Press (2016).
3. M. Barthélemy, "The statistical physics of Cities", *Nature Reviews Physics*, 1 (2019) 406–415.
4. H.A. Makse et al., "Modelling urban growth patterns", *Nature*, 377 (1995) 608-612.
5. M. Kardar et al., "Dynamic scaling of growing interfaces", *Physical Review Letters*, 56 (1986) 889.
6. T. Louail et al., "From mobile phone data to the spatial structure of cities", *Scientific Reports* 4 (2014) 5276.
7. T. Louail et al., "Uncovering the spatial structure of mobility networks", *Nature Communications*, 6 (2015) 6007.
8. R. Louf et M. Barthélemy, "Modeling the polycentric transition of cities", *Physical Review Letters* 111 (2013) 198702.
9. M. Fujita et H. Ogawa, "Multiple equilibria and structural transition of non-monocentric urban configurations", *Regional science and urban economics* 12 (1982) 161-196.
10. R. Louf et M. Barthélemy, "How congestion shapes cities: from mobility patterns to scaling", *Nature Scientific Reports* 4 (2014) 5561.
11. E. Wigner, *Annals of Mathematics* 62 (1955) 548-564.
12. V. Verbavatz et M. Barthélemy, "Critical factors for mitigating car traffic in cities", *PLoS ONE* 14(7) (2019) e0219559.
13. P.W. Newman et J.R. Kenworthy, *Journal of the American Planning Association* 55 (1989) 2437.

Il y a cinquante ans : les premières réactions de fusion nucléaire induites par laser

Jean-Louis Bobin (jean-louis.bobin@sorbonne-universite.fr)

Professeur émérite à Sorbonne Université

Peu après l'invention des lasers au début des années 1960, des calculs d'ordre de grandeur montraient leur intérêt pour la fusion nucléaire. En même temps, débutaient discrètement des programmes de recherches dans des laboratoires à vocation militaire. C'est ainsi qu'au centre de Limeil de la Direction des Applications Militaires du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA-DAM) fut lancée l'étude des plasmas créés par laser, en coopération avec les Laboratoires de Marcoussis de la Compagnie Générale d'Électricité (CGE).

Cet effort, dont l'histoire est relatée dans cet article, a abouti à un résultat spectaculaire pour l'époque (1969) : une émission de neutrons contrôlable.



Deux exemples des suites d'une communication naïve (voir p. 25). La photo remise à la presse d'un bâtonnet de deutérium solide irradié par laser ne précisait pas le sens vertical (comparer avec la figure 3b, p. 24). Les journalistes ont reproduit ce qu'ils avaient vu.

La fusion nucléaire par laser, une idée dans l'air des années 1960

Matérialisation d'un vieux rêve de l'humanité, l'amplification de la lumière, le laser, inventé en 1960 [1], fut d'abord un simple objet de curiosité : « *solution sans problème* » disaient les persifleurs de service. On se mit donc à la recherche de problèmes. Parmi tous les domaines qui s'ouvrirent alors, la fusion nucléaire fit l'objet d'un développement particulièrement dynamique. Les fortes intensités lumineuses qu'il était envisageable d'atteindre à partir de lasers laissaient en effet entrevoir la

possibilité d'obtenir, par conversion d'énergie lumineuse en énergie thermique, les conditions nécessaires à une combustion thermonucléaire des isotopes lourds de l'hydrogène, deutérium et tritium. Le laser pouvait-il apporter une alternative crédible au confinement magnétique, seule voie explorée jusque-là et qui alors marquait le pas ? En l'espace de quelques mois, aux États-Unis, en Europe et dans ce qui était alors l'URSS, on effectua les premiers calculs. Il apparut qu'avec des hypothèses raisonnables sur la dynamique du procédé, des conditions d'intérêt thermonucléaire sont atteintes [2].

>>>

>>>

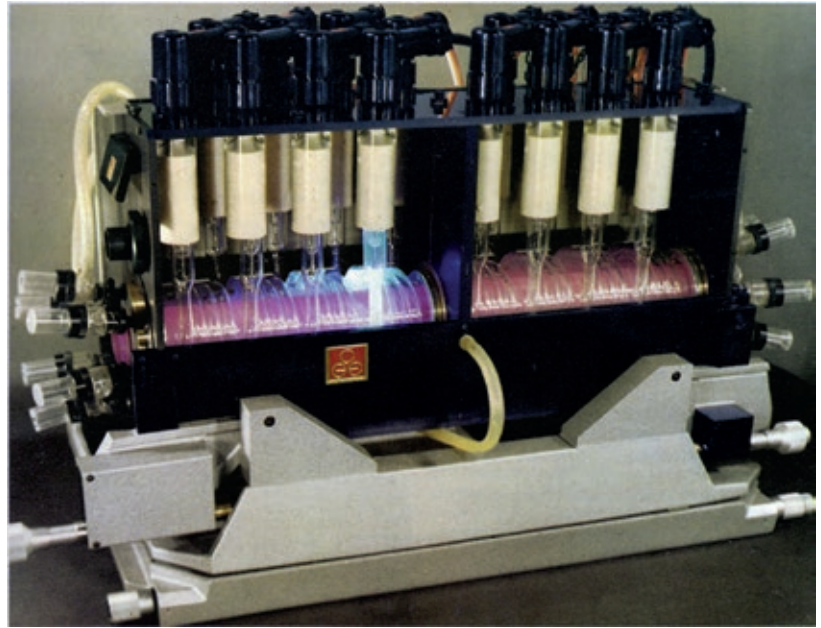
L'histoire eut aussi une face cachée. À Livermore, laboratoire californien spécialisé dans les programmes thermonucléaires, des experts de la physique des armes [3] utilisèrent leurs connaissances pour élaborer, à l'aide de codes numériques, des schémas qui entrent aujourd'hui dans la catégorie connue sous le nom de « Fusion par Confinement Inertiel » (FCI). Dans les années 1960, de telles idées relevaient du secret le plus absolu et ne furent donc pas rendues publiques. Un modeste programme expérimental fut lancé à partir de 1962.

Aux États-Unis comme en France, l'histoire de la fusion par laser pendant cette période est mal connue^(a). Pour la France, on trouve quelques indications sous la forme de souvenirs personnels dont Jean Robieux (voir l'encadré ci-dessous), alors figure de proue des Laboratoires de Marcoussis appartenant au groupe de la Compagnie Générale d'Électricité (CGE)^(b), a parsemé ses ouvrages [4]. Il est peu loquace sur la partie CEA des travaux exécutés en collaboration avec le Centre d'Études de Limeil.

Aux origines

Exception parmi les chercheurs ayant réagi à l'invention des lasers en pensant à la fusion nucléaire, Jean Robieux travaillait dans un environnement industriel. Il était chargé, à la tête du département de Recherches Physiques de Base des Laboratoires de Marcoussis, de mettre en œuvre des innovations susceptibles d'ouvrir des marchés à des produits de haute technologie fabriqués et commercialisés par le groupe CGE. Il fut immédiatement séduit par les potentialités des lasers et proposa d'en développer les applications dans des domaines aussi variés que les télécommunications (un des métiers de base de la CGE), la séparation isotopique ou encore la fusion thermonucléaire.

Robieux attaqua le problème de la fusion par laser avec des idées qui aujourd'hui paraissent bien naïves. Mais, à l'époque, elles ont permis un utile débroussaillage, grâce à quelques calculs d'ordre de grandeur. On connaît depuis les années 1950 les conditions favorables à la fusion thermonucléaire^(c). Transposées au cas de la lumière laser irradiant une cible, elles se traduisent par une triple exigence : être capable d'ioniser, de chauffer jusqu'à 10^8 K, et que la réaction deutérium-tritium ait lieu



1. Amplificateur de puissance de la CGE : standard des années 1960 pour un barreau de verre au néodyme de diamètre 5 cm.

pendant un temps τ suffisant pour satisfaire au critère de Lawson : $n \tau \geq 10^{14} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}$, où n est la densité des ions (nombre par cm^3).

À l'état solide, la densité ionique est d'environ $5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$, ce qui impose un temps de confinement supérieur à 2 nanosecondes (ns). Il faut compter sur l'inertie de la matière même chaude pour que la densité du solide soit maintenue au moins pendant ce temps.

Les lasers de 1961-62 étaient de toutes premières réalisations aux performances modestes, une fraction de joule en 100 ns. Les chiffres obtenus par Robieux indiquaient l'effort minimal à produire en matière de technologie laser pour pouvoir réaliser les

conditions de la fusion nucléaire. Alertée, la direction de la CGE réagit favorablement à l'idée que le potentiel de recherche et de développement de l'entreprise permettait de se lancer dans l'étude et la réalisation de lasers plus puissants et aux durées d'impulsion plus courtes qu'on n'avait su le faire jusqu'alors.

Selon une tradition bien française, la CGE avait ses relais au plus haut niveau gouvernemental. Des rapports [5] firent, fin 1962 et début 1963, leur chemin jusqu'au sommet de l'État. Confidentiels, ils ne furent pas publiés dans la littérature scientifique, empêchant ainsi Jean Robieux de figurer parmi les pères fondateurs reconnus de la fusion nucléaire par laser.

Jean Robieux

Ancien élève de l'École polytechnique, docteur es-sciences et titulaire d'un Master of Sciences du California Institute of Technology (Caltech), Jean Robieux (1925-2012) fut l'un des principaux spécialistes français du laser et de l'optique. Il est à l'origine de la découverte du principe du contrôle de la fusion nucléaire par laser, puis du principe de la séparation isotopique par laser.

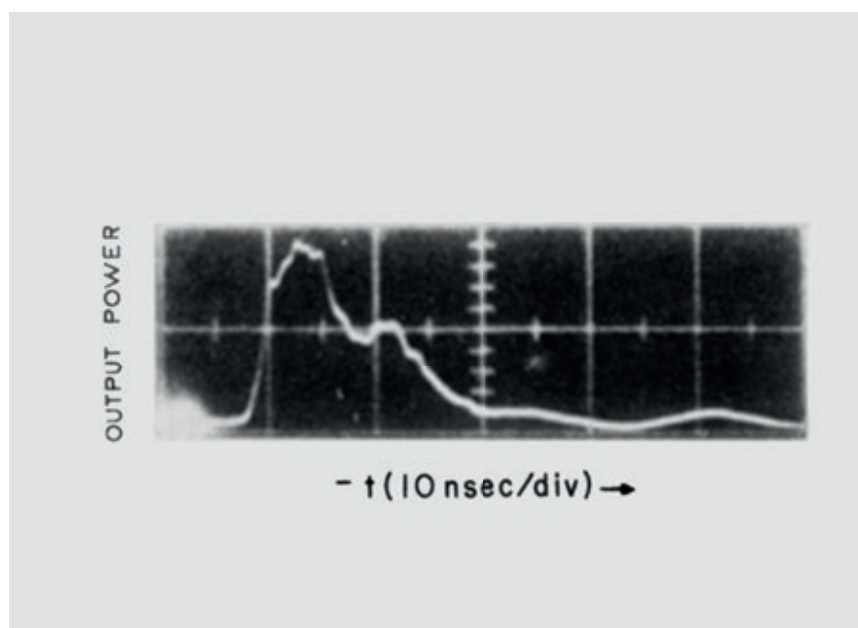
Il a été président de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale, et membre des Académies des sciences et des technologies.



Jean Robieux en 2010

© Robieux (Wikimedia Commons)

Source : F. Floux, Rapport CEA-R-34773



2. Impulsion laser mise en forme après découpage. En 1969, la puissance en bout de chaîne ("output power") pouvait atteindre 7 GW.

Cependant, ses idées donnèrent lieu à un dépôt de brevets d'invention publiés au *Bulletin officiel de la propriété industrielle* [6]. Sous le même titre : « *Dispositif de fusion thermonucléaire commandée* », ils ont été soumis en 1963 par la CGE, mais ne furent officiellement accordés qu'en juin 1968, après un long délai justifié par le caractère de leur contenu considéré pendant tout ce temps comme sensible.

Le lobbying exercé par la CGE se traduit par le financement d'un programme de recherches sur la fusion par laser mené en commun avec le CEA. Par l'intermédiaire de la Direction des Recherches et Moyens d'Essais (DRME) du ministère des Armées, les Laboratoires de Marcoussis recevaient une dotation pluriannuelle pour développer des lasers de puissance. La partie interaction avec des cibles et fusion nucléaire était confiée au centre de Limeil de la Direction des Applications Militaires (DAM) du CEA, où les personnels avaient la compétence requise en matière de recherches thermonucléaires, avec l'avantage de travailler au sein d'un environnement où la discrétion est le plus souvent impérative. Le futur ministre^(d) Pierre Aigrain, alors directeur à la DRME, fit beaucoup pour cet arrangement.

Des lasers de plus en plus puissants

Le programme de recherches entrepris à Limeil utilisait pour l'essentiel des lasers conçus et réalisés par le partenaire institutionnel, la CGE, à partir de cahiers des charges élaborés en commun.

Grâce aux efforts conjugués des deux parties, on assista à une progression spectaculaire des performances, de l'encombrement et... du coût des lasers de puissance à impulsion géante. Bien au-delà du modeste oscillateur à rubis ou à verre des débuts, on aboutit à des ensembles imposants qu'on imaginait, avec raison comme le prouva la suite, presque indéfiniment extensibles. Leur architecture générale devenue un standard, comportait un étage pilote où se formait l'impulsion dans un barreau oscillateur en cavité. L'impulsion traversait ensuite une cascade d'amplificateurs dont le diamètre des barreaux allait croissant. L'augmentation du diamètre du faisceau était assurée par des systèmes afocaux insérés entre les étages d'amplification.

Le matériau actif des lasers construits par la CGE était le verre au néodyme émettant dans l'infrarouge à une longueur d'onde de 1 μm . Ce matériau permettait de se fournir chez des industriels hexagonaux héritiers d'une longue tradition d'excellence.

Dans les amplificateurs (fig. 1), le barreau de verre était entouré d'une lampe éclair (« flash ») hélicoïdale disposée à l'intérieur d'un réflecteur métallique. Le diamètre des barreaux de verre ne peut pas croître au-delà d'une dizaine de centimètres, soit le double de la longueur d'absorption de la lumière des flashes. Or l'intensité lumineuse doit rester inférieure à une valeur garantissant l'absence de dommages. Il existait ainsi une double limitation (toujours présente sur les instruments des générations suivantes) : le diamètre d'un faisceau et la puissance qu'il peut transporter.

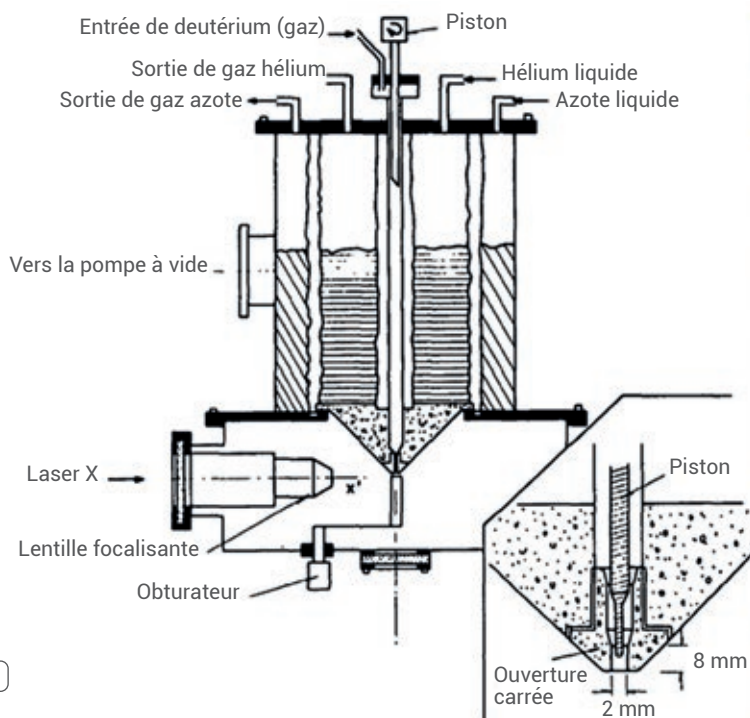
Les perfectionnements apportés aux lasers de puissance eurent pour effet de porter à 500 joules l'énergie contenue dans une impulsion lumineuse de 30 nanosecondes, démonstration faite à Marcoussis en 1967 [7]. Par ses réalisations, la CGE se trouvait à cette date largement en tête de la course à la puissance. Les chercheurs de Limeil avaient ainsi la possibilité de devancer leurs concurrents.

La tendance générale qui se dégageait des expériences d'interaction était qu'il fallait aller vers des impulsions laser, certes plus puissantes mais aussi plus courtes que les 30 ns à mi-hauteur fournies par l'oscillateur de base, quelle que soit la méthode de déclenchement. Le front de montée devait être raidi sur plusieurs ordres de grandeur d'intensité. Autour de 1967-1968, on plaça une cellule appelée cellule de Pockels en sortie de pilote. Grâce à une électronique *ad hoc*, elle découpait dans l'impulsion géante, trop longue, une forme mieux adaptée aux demandes (fig. 2). Pour compenser partiellement la perte d'énergie due à la mise en forme, on ajouta un étage d'amplification.

La création de plasma au moyen d'un faisceau laser est une conséquence de la concentration d'énergie obtenue au foyer d'une lentille ou d'un miroir. La qualité de la focalisation est d'une extrême importance. Après divers tâtonnements, on adopta le principe d'une lentille plan-convexe dont la surface courbe était asphérique et calculée point par point [8].

Pour la fabrication, on s'adressa à l'Institut d'Optique où il existait une machine à commande numérique capable, à partir d'un tableau de données, de tailler le verre suivant n'importe quelle surface courbe. De magnifiques pièces d'optique dont le diamètre dépassait 10 cm furent ainsi réalisées.

>>>



3. Le dispositif expérimental.

(a) Schéma du cryostat et (en bas à droite) détail de la filière d'extrusion [9].
 (b) Impact d'un faisceau laser sur un glaçon de deutérium, extrudé du dispositif (a).

>>> L'irradiation des solides

Pour obtenir des réactions de fusion nucléaire, il fallait des cibles solides riches en isotopes lourds de l'hydrogène, essentiellement du deutérium, le tritium plus réactif étant cher, radioactif et de manipulation délicate. À Limeil, où l'on pratiquait des techniques de réfrigération jusqu'à la température de l'hélium liquide, le choix s'était porté sur le deutérium solide. Mais le pari était osé. Allait-on obtenir un solide avec des surfaces planes bien définies en vue de l'interaction ? Quel serait son comportement sous vide ?

La méthode adoptée était simple : d'abord condensation du gaz dans un cryostat, solidification puis extrusion par le fond à travers une ouverture carrée, la pression étant exercée par un piston enfoncé manuellement au moyen d'une vis. Ce dispositif (fig. 3a) était superposé à une chambre d'interaction où régnait un vide secondaire. Il donna du premier coup d'excellents résultats [9]. Sans être tout à fait comparable à du dentifrice, le deutérium solide se révéla suffisamment plastique pour être extrudé, mais assez rigide pour

garder sa forme sous vide en attendant le tir laser (fig. 3b). Le point de focalisation ne pouvait être éloigné de plus d'un centimètre du « nez » de la filière.

Les contraintes étaient sévères pour un ensemble où devaient cohabiter de très basses et de très hautes températures : les quelques kelvins de l'hélium liquide du cryostat et les millions de degrés du plasma d'interaction, celui-ci heureusement très localisé et transitoire.

Les neutrons qui venaient du froid

La préparation de bonnes cibles en deutérium étant assurée, les expériences d'interaction se sont déroulées de façon très méthodique. Elles étaient, à la fin de 1968, à la pointe de la physique et de la technique. Les mesures de la température du plasma en fonction de l'intensité laser laissaient espérer des réactions thermonucléaires deutérium-deutérium (D-D), aisément identifiables grâce aux neutrons de 2,45 MeV produits.

Ceux-ci étaient détectés de deux façons. D'abord par des scintillateurs plastiques

d'assez grand volume pour suivre, avec une résolution comparable à celle des autres diagnostics, l'évolution temporelle de leur émission et mesurer leur énergie par temps de vol. Ensuite, par des compteurs au trifluorure de bore pour évaluer leur nombre.

Or, en 1968, des émissions de neutrons, mais sporadiques et faibles, avaient été annoncées par des chercheurs de l'institut Lebedev à Moscou. Une équipe de cet institut avait détecté des neutrons en irradiant avec des impulsions picoseconde des cibles deutérées.

À Limeil, les neutrons se firent attendre jusqu'au début de l'été 1969. Leur nombre, comptabilisé par les compteurs, était beaucoup plus important que chez les Russes : quelques milliers contre quelques dizaines. Ce résultat fut placé sous embargo, le temps qu'une étude systématique montre de façon indiscutable que cette émission était contrôlable.

À la fin du mois d'août 1969, les certitudes étaient acquises : des neutrons pouvaient être produits dans des conditions prévisibles et reproductibles, en irradiant du deutérium solide avec les impulsions laser nanoseconde à front raide.

Après le froid, le show

Les hautes sphères du CEA furent aussitôt avisées du succès de ces expériences. Annonce fut alors faite *urbi et orbi* par l'intermédiaire d'un communiqué à l'agence France-Presse. Une note à l'Académie des sciences, transmise par le Haut-Commissaire Francis Perrin, était également prévue. Le retentissement hexagonal fut suffisamment grand pour obliger de réunir en toute hâte une conférence de presse à Limeil, qui se tint en fin d'après-midi du lundi 15 septembre 1969, le même jour que la présentation à l'Académie.

Quelle aubaine ! Un centre militaire du CEA s'ouvrait aux journalistes qui, connus ou obscurs, vinrent en foule. Les hiérarchies du CEA, de la DRME et de la CGE, étaient là aussi. Tous les visiteurs eurent droit, par groupes, à une démonstration de tir laser. Afin que l'ensemble des présents autour de la chambre d'interaction puisse voir l'expérience, on avait formé sur un écran, au moyen d'une lentille, une image agrandie mais renversée du gaçon de deutérium

pendu à son porte-cible. Largement diffusée, l'image de l'irradiation d'un bâtonnet dressé sur un piédestal est entrée dans la légende (voir les couvertures de deux revues, reproduites p. 21, et comparer avec la figure 3b).

Retombées

Cet aboutissement de recherches menées depuis 1963 a marqué une étape importante dans le programme laser du CEA-DAM.

L'émission des neutrons fit l'objet de nombreux articles et rapports [10]. Au-delà de l'obtention de neutrons, de solides connaissances, tant théoriques que pratiques, avaient été acquises à la fin des années 1960 sur la dynamique des plasmas créés par impact laser. Combinées à la déclassification, en 1972, de la fusion inertielle par compression de granules jusqu'à des densités de l'ordre de 10 000 fois celle du solide [11], elles ont contribué à lancer les développements qui ont conduit à la construction et à l'exploitation du laser mégajoule [12]. ■

(a) Un historien des sciences du Stevens Institute of Technology, Alex Wellerstein, a effectué quelques recherches sur le sujet, limitées aux USA. Ses travaux n'ont pas été publiés mais présentés lors de diverses conférences, dont l'une à Paris le 17 décembre 2015. On peut lire un compte rendu de l'une de ces présentations sous le titre "The twisted tale of laser fusion" sur le blog de la journaliste scientifique Chelsey B. Coombs : <http://scienceline.org/author/chelsey-b-coombs/>.

(b) Futur Alcatel-Lucent, et aujourd'hui Nokia.

(c) Pour des généralités sur la fusion nucléaire, voir M. Decroisette, *Reflets de la physique* 21 (2010) 35-38 et J. Jacquinot, *Reflets de la physique* 32 (2013) 19-25.

(d) P. Aigrain a été président de la Société Française de Physique en 1986.

Références

- 1• T.H. Maiman, *Nature* 187 (1960) 493 ; *The Laser Odyssey*, Laser Press (2000).
- 2• N. G. Basov et O. N. Krokhin, *Soviet Physics JETP* 19 (1964) 123 ; A. Kastler, *C.R. Acad. Sc. Paris*, 258 (1964) 489 ; J.M. Dawson, *Phys. Fluids* 7 (1964) 981.
- 3• R. E. Kidder, *Laser Fusion : The First Ten Years 1962-1972*, UCRL-BOOK-222681 (2006) ; J. H. Nuckolls, *Contributions to the Genesis and Progress of ICF*, UCRL-BOOK-219136 (2006).
- 4• J. Robieux, *High Power Interactions*, Éditions Lavoisier (2000) ; *Vers l'énergie abondante sans pollution. La fusion nucléaire par laser*, Éditions Louis de Broglie / Librairie Eyrolles (2008).
- 5• Pour des généralités sur la fusion nucléaire, voir M. Decroisette, *Reflets de la physique* 21 (2010) 35-38, et J. Jacquinot, *Reflets de la physique* 32 (2013) 19-25.
- 5• J. Robieux et R. Rocherolles, *Production de plasmas très denses et très chauds à partir de l'état solide illuminé par un faisceau laser très puissant*. Rapports CGE du 26 novembre 1962 et du 7 février 1963.
- 6• *Bulletin officiel de la propriété industrielle*, n° 29 (1968).
- 7• J. Robieux et al., *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 5 (1968) 360.
- 8• J.L. Champetier et al., *C. R. Acad. Sc. Paris*, 266 (1968) 838
- 9• Dispositif présenté dans : J.L. Bobin et al., *Nuclear Fusion* 9 (1969) 115.
- 10• Dont : F. Floux et al., *Phys. Rev.* 1A (1970) 821 ; J. L. Bobin et F. Floux, Rapport CEA R-4255 (1971).
- 11• J. Nuckolls et al., *Physics Today*, 26 (1973) 46 ; K.A. Brueckner et S. Jorna, *Rev. Mod. Phys.* 46 (1974) 325.
- 12• www-lmj.cea.fr

.....
 « La méthode adaptée était simple : d'abord condensation du gaz [deutérium] dans un cryostat, solidification puis extrusion par le fond à travers une ouverture carrée, la pression étant exercée par un piston enfoncé manuellement... »

À la fin du mois d'aout 1969, les certitudes étaient acquises : des neutrons étaient produits dans des conditions prévisibles et reproductibles, en irradiant du deutérium solide avec les impulsions laser nanoseconde à front raidi. »

La (dis-)simulation FPU : une Femme Physicienne Underground

Mary Tsingou et l'histoire de la première expérience numérique

Thierry Dauxois (Thierry.Dauxois@ens-lyon.fr)

Laboratoire de Physique de l'ENS de Lyon (UMR5672 CNRS, Université Claude Bernard Lyon 1, École normale supérieure de Lyon), 69342 Lyon Cedex 07

La programmation de la toute première expérience numérique, dite de Fermi-Pasta-Ulam (FPU), a été effectuée par une jeune femme nommée Mary Tsingou dont le nom a été malencontreusement oublié. Après plusieurs années de recherches infructueuses, il m'a été possible de retrouver sa trace tout près du lieu de ses premiers travaux.

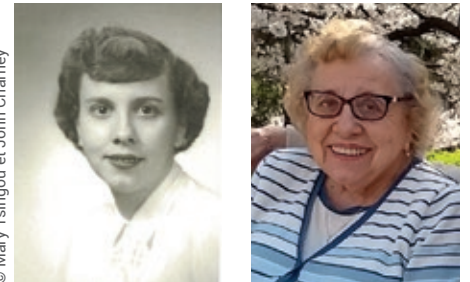
Cette simulation numérique est d'une importance capitale en physique non linéaire.

Il est temps de faire réapparaître le nom de Mary Tsingou, qui a été écrit à l'encre sympathique sur l'article fondateur : reconnaissons sa contribution et parlons désormais du problème de Fermi-Pasta-Ulam-Tsingou (FPUT).

Le problème FPU

Le problème de Fermi-Pasta-Ulam (FPU) [1], d'abord décrit dans un rapport classifié de Los Alamos en mai 1955, est souvent considéré comme le point de départ d'un nouveau domaine, la physique non linéaire ; mais c'est aussi la toute première expérience numérique. L'idée était de simuler l'analogue unidimensionnel d'atomes dans un cristal : une longue chaîne de masses reliées par des ressorts qui obéissent à la loi de Hooke (une interaction linéaire) à laquelle on rajoute un faible terme non linéaire. Une interaction purement linéaire garantirait que l'énergie introduite dans un seul mode de vibration de Fourier reste toujours dans ce mode ; le terme non linéaire permet en revanche le transfert d'énergie entre les modes. Dans certaines conditions, le système faiblement non linéaire présente cependant un comportement surprenant : il n'évolue pas vers l'équipartition de l'énergie prévue par la physique statistique mais retourne périodiquement vers la situation de départ (fig. 1). Ce résultat tout à fait remarquable, connu sous le nom de paradoxe de FPU, montre que la non-linéarité ne suffit pas à garantir l'équipartition de l'énergie.

Dans les années 1960, à la recherche de la solution du paradoxe de FPU, Norman Zabusky et Martin Kruskal ont examiné le problème dans l'espace réel plutôt que dans l'espace de Fourier [2]. Cela leur a permis d'expliquer le comportement périodique grâce à la dynamique d'excitations non linéaires et localisées spatialement, que



Mary Tsingou en 1955 et en 2019.

l'on connaît de nos jours sous le nom de « solitons ». Ces ondes localisées, ou solitaires, auxquelles on peut associer des propriétés de particules (d'où le suffixe « -on » qui a justement été proposé dans cet article) ont de nombreuses applications physiques et constituent aujourd'hui un champ d'étude à part entière. Il couvre non seulement les tsunamis (un mot d'origine japonaise dont la signification, « vague dans le port », traduit très bien son aptitude à détruire) mais aussi la capacité de transmettre de l'information à très haut débit dans des fibres optiques, en passant par de nombreuses autres applications physiques [3].

Une autre ligne de recherche issue du paradoxe de FPU, développée parallèlement aux travaux sur les solitons, s'est plus particulièrement focalisée sur la dynamique du mode de Fourier de départ. En particulier, avec la découverte du théorème de Kolmogorov-Arnold-Moser, il a été prouvé qu'en général les orbites dans l'espace des phases de systèmes hamiltoniens intégrables

restent quasi périodiques lorsqu'ils ne sont que légèrement perturbés. En revanche, si la perturbation est trop forte, la récurrence est détruite et l'équipartition de l'énergie s'établit rapidement [4].

Le problème de FPU est donc d'une importance centrale dans le domaine des solitons ainsi que dans celui du chaos, et est également intimement lié à la physique statistique hors équilibre [5] (voir l'encadré, p. 29). Encore aujourd'hui, de nombreux articles, séminaires et conférences sont dans cette lignée. Mais, malgré toute l'attention portée au problème de FPU et à son histoire, un point intrigant n'a guère été mentionné.

Le mystère des signatures

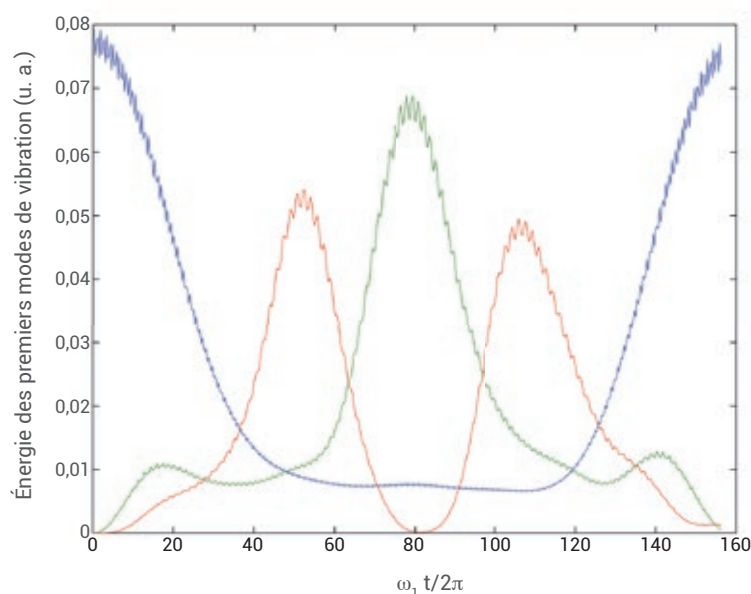
La première page du rapport sur le travail déposé en 1955 à Los Alamos indique : *“Report written by Fermi, Pasta, and Ulam. Work done by Fermi, Pasta, Ulam, and Tsingou.”*

Cette remarque, selon laquelle Mary Tsingou a participé à l'étude numérique mais n'est pas auteure du rapport, a déconcerté les scientifiques qui ont lu ce document. Programmer un ordinateur dans les années 1950 n'était pas une tâche triviale. Pourquoi sa contribution n'a-t-elle reçu qu'une note de deux lignes ?

Ceux qui approfondissent la littérature sur FPU ont généralement lu un article publié en 1972 de James Tuck et M. T. Menzel [6]. Une lecture attentive de l'introduction révèle que Menzel a été impliqué dans le codage du problème original, mais personne de ce nom n'est mentionné dans le rapport de Los Alamos. Comment résoudre ce paradoxe ?

La solution est que dans le nom M. T. Menzel, M est pour Mary et T pour Tsingou. Il n'y a donc pas de paradoxe, c'est la même personne, utilisant son nom de femme mariée ! Intrigué par cet élément, je me suis demandé alors ce que cette femme était devenue et j'ai posé des questions, longtemps restées sans réponse. Un jour, j'eus l'idée d'utiliser tout simplement *Web of Science* (qui a donc bien une utilité !) qui révéla que M. T. Menzel avait publié avec un certain J. L. Gammel. Coup de chance, au cours de ma thèse, j'avais logé plusieurs mois à Los Alamos chez Tinka Gammel, la fille de ce dernier. À peine avais-je évoqué cette histoire à ma logeuse (que je savais concernée par la cause des femmes), qu'elle fit son possible pour m'aider ; et nous avons découvert que son propre père, qui travaillait encore dans ce prestigieux laboratoire, avait effectivement travaillé avec M. Menzel, née Tsingou. Il l'avait perdue de vue, mais sa trace a pu être retrouvée.

>>>



1. La récurrence FPU. Évolution de l'énergie totale (cinétique + potentielle) des trois premiers modes linéaires dans l'expérience numérique de FPU. Initialement, seul le mode de plus grande longueur d'onde est excité (ligne bleue). Après un transfert vers les modes 2 (vert), 3 (rouge) ..., l'énergie revient presque complètement vers le premier mode : cette récurrence fut une surprise totale, et resta longtemps inexplicée.

.....

« Le problème de FPU est d'une importance centrale dans le domaine des solitons ainsi que dans celui du chaos, et est également lié à la physique statistique hors équilibre. »

« C'est aussi la toute première expérience numérique. [...] Son résultat, tout à fait remarquable, montre que la non-linéarité ne suffit pas à garantir l'équipartition de l'énergie. »

.....

La physique hors d'équilibre et l'importance d'enseigner la physique non linéaire

Les phénomènes hors d'équilibre sont au cœur de notre monde

L'expérience numérique de Fermi-Pasta-Ulam-Tsingou (FPUT) [a] peut être considérée comme l'un des points de départ d'un fort engouement pour la physique hors d'équilibre, discipline toujours féconde aujourd'hui. La physique statistique s'est logiquement d'abord intéressée à l'équilibre, qui permet déjà d'expliquer de nombreux phénomènes ; mais le fait même que l'équilibre puisse être atteint n'est pas si évident, même pour des systèmes simples comme l'a montré l'expérience numérique de FPUT. Il n'est pas étonnant qu'Enrico Fermi se soit posé cette question puisque, à l'âge de 17 ans, il avait lu puis prolongé certains travaux d'Henri Poincaré, avant de développer à 25 ans la statistique à l'équilibre pour les particules quantiques connues maintenant sous le nom de fermions.

Aujourd'hui encore, cette problématique de la relaxation vers l'équilibre est au cœur de la physique.

1) Il est désormais bien établi que les systèmes physiques avec des interactions à longue portée peuvent avoir des temps de relaxation gigantesques, voire ne pas relaxer vers l'équilibre sur des temps physiquement pertinents [b]. Les systèmes gravitationnels, les fluides géophysiques, les lasers en interaction avec des particules..., font partie de cette catégorie. Cela permet de comprendre pourquoi, alors que les forces gravitationnelles et électromagnétiques sont centrales dans les cours de licence ou de classes préparatoires, elles ne sont pas traitées dans la majorité des cours et livres de mécanique statistique.

2) Les verres forment une deuxième catégorie de systèmes présentant des relaxations vers l'équilibre très lentes [c]. Leur paysage énergétique est extrêmement ramifié et complexe, et explique vraisemblablement leur rigidité. Leurs descriptions dans le cadre de la physique statistique peuvent être aussi considérées comme des modèles pour l'étude des protéines où les questions aussi fondamentales que le désordre, la réponse non linéaire et la relaxation vers l'équilibre sont cruciales.

3) Plus récemment, c'est le monde quantique qui se passionne pour des études tant théoriques qu'expérimentales de cette relaxation vers l'équilibre. De belles expériences [d] consistant à exciter des modes dans des condensats de Bose-Einstein sont même très proches, dans l'esprit, de l'expérience de FPUT.

Étudier tous ces systèmes avec les outils de la physique non linéaire ouvre de nouveaux points de vue très fructueux.

Enseigner la physique des systèmes dynamiques

Les phénomènes non linéaires sont la règle en physique ! Découvrir à travers un cours introductif les systèmes dynamiques et le chaos devrait faire partie de la formation de tout(e) physicien(ne) et non pas être réservé aux spécialistes. Cette initiation sera essentielle si elle ou il ambitionne d'être chercheur, car la prédominance du concept de déterminisme dans nos formations cache certains comportements pourtant importants. C'est aussi central dans beaucoup d'autres domaines que la physique, par exemple en écologie ou bien en économie, puisque ces deux champs disciplinaires ont mis en évidence que les notions d'instabilité et de bifurcations entre régimes radicalement différents étaient capitales !

Ces idées sont trop peu enseignées dans nos formations et trop peu assimilées par nos concitoyens, même dans les sphères politiques ! Comprendre que prévoir la météo pour la fin de la semaine est notoirement difficile (justement les modèles sont chaotiques), mais que cela n'empêche pas de prédire le climat dans quelques dizaines d'années, est important. Cette idée était déjà contenue dans l'excellent article de Edward N. Lorenz (1963) [e] et peut être présentée sans difficulté au niveau Master 1, voire plus tôt en regardant sans modération de splendides et très éducatives vidéos [f]. Lorenz ne s'est pas contenté d'identifier l'essence du chaos (Henri Poincaré l'avait d'ailleurs fait avant lui), en mettant en évidence qu'une description très précise du futur dépend de manière ultra sensible de notre connaissance du présent, beaucoup trop sensible en pratique pour faire des prédictions. Il a aussi, et peut-être surtout, montré qu'une approche statistique permet de prédire des comportements globaux. En effet, le chaos conduit en général à une plus grande exploration de l'espace des phases, ce qui permet d'utiliser la notion de moyenne de façon beaucoup plus efficace. À cause de la sensibilité forte aux conditions initiales, le prévisionniste ne sera donc pas en mesure d'affirmer que « le soleil illuminera le Musée des Confluences à Lyon tel jour précis ». En revanche, il pourrait prédire la température moyenne à Lyon au mois de juillet dans 50 ans. C'est donc l'alliance de la physique non linéaire et de la physique statistique, ce que l'on nomme physique hors d'équilibre, qui se révèle être la bonne approche.

La première expérience numérique codée par Mary Tsingou a donc aussi permis de découvrir un domaine inexploré jusqu'alors et pourtant très important. Au cours des années, la communauté française a joué un rôle prépondérant dans sa compréhension. Il faudrait aussi raconter cette histoire.

[a] E. Fermi, J. Pasta, S. Ulam, M. Tsingou, "Los Alamos Scientific Laboratory report LA-1940" (1955). Publié plus tard par E. Segrè (éd.), dans *Collected Papers of Enrico Fermi*, Vol. 2, U. Chicago Press, Chicago (1965).

[b] A. Campa, T. Dauxois, D. Fanelli, S. Ruffo, *Physics of Long-Range Interacting Systems*, Oxford University Press (2014).

[c] A.P. Young (éd.), *Spin glasses and random fields*, World Scientific (1998).

[d] N. Navon, A. L. Gaunt, R. P. Smith, Z. Hadzibabic, "Emergence of a turbulent cascade in a quantum gas", *Nature* **539** (2016) 72-75.

[e] E.N. Lorenz, "Deterministic nonperiodic flow", *Journal of the Atmospheric Sciences* **20** (1963) 130.

[f] J. Leys, E. Ghys, A. Alvarez : www.chaos-math.org/fr.html.

revanche que peu de contacts avec Enrico Fermi qui était professeur à Chicago et ne visitait Los Alamos que pendant de courtes périodes durant l'été. Elle connaissait cependant beaucoup mieux la fille de Fermi, Nella, qui ne voulait pas rester en permanence avec ses parents pendant leurs visites à Los Alamos. Les deux jeunes femmes ont donc dormi dans le même dortoir, tandis qu'Enrico et Laura Fermi étaient accueillis par leurs bons amis Stan et Françoise Ulam.

C'est Fermi qui a eu le génie de proposer qu'au lieu de simplement effectuer des calculs standard, les ordinateurs puissent être utilisés pour tester une idée physique. Après ses contributions de toute première importance, tant expérimentales que théoriques, qui lui valent un respect éternel des physiciens, Fermi inventa ainsi le concept d'expériences numériques : c'est beaucoup moins connu. Fermi proposa donc de vérifier la prédiction de la physique statistique sur la thermalisation des solides. Des calculs préliminaires ont confirmé le résultat attendu, à savoir que l'énergie introduite dans un mode de Fourier unique dérive vers d'autres modes. Le comportement quasi périodique n'a pas été observé au début, car l'ordinateur était trop lent pour permettre à une simulation numérique de fonctionner assez longtemps. Mais un jour l'ordinateur ne s'est pas arrêté comme prévu et le calcul a continué de tourner. Les chercheurs ont constaté à leur grande surprise que la quasi-totalité de l'énergie était revenue au mode initial et que l'état initial

était presque parfaitement retrouvé. Ce fut le début d'une recherche fructueuse [5].

L'algorithme utilisé par Tsingou sur le MANIAC en 1955 pour simuler la relaxation de l'énergie dans un cristal modèle est reproduit dans la figure 2 ; je l'ai retrouvé en 2007 dans sa cave lors d'une visite chez elle [8]. Sa complexité peut être comparée aux quinze lignes de code Matlab qui sont suffisantes pour une simulation moderne FPU [9]. Programmer les premiers ordinateurs était une tâche qui exigeait beaucoup de perspicacité et d'originalité et, tout au long des années 1960 voire plus tard, les programmeurs étaient souvent mentionnés comme coauteurs. Il a été souvent avancé que la raison pour laquelle Tsingou était citée comme collaboratrice, mais pas comme coauteure, est qu'elle n'avait pas participé à l'écriture du rapport, bien qu'elle ait produit certains graphiques. En fait, Fermi n'était pas impliqué dans l'écriture non plus puisqu'il est mort en 1954, avant la rédaction du rapport [10]. Il me semble plus juste d'avancer que la distinction entre l'écriture et le travail accompli sur le document classé secret a probablement été mal comprise par les lecteurs ultérieurs.

En 1958, Tsingou épousa Joseph Menzel, qui travaillait également à Los Alamos, pour la Force de protection de la Commission de l'énergie atomique. Elle resta dans cette petite ville alors même que ses collègues partaient : Metropolis pour Chicago, Pasta pour Washington et Ulam pour le Colorado. Elle travailla sur de nombreux

problèmes différents, toujours avec des ordinateurs. Elle devint l'une des premières expertes en Fortran, inventé par IBM en 1955, et fut chargée d'aider les chercheurs du laboratoire.

Après son travail de programmation sur le MANIAC, Tsingou est revenue sur le problème de FPU avec Tuck au début des années 1970 pour étudier les récurrences plus longues [6]. Elle a également examiné les solutions numériques des équations de Schrödinger et a travaillé avec John von Neumann pour étudier le mélange de deux fluides de densités différentes. Sous la présidence de Ronald Reagan enfin, elle a été aussi profondément impliquée dans les calculs du projet Star Wars.

Retraitee en 1991, Mary Tsingou Menzel vit toujours aujourd'hui à plus de 90 ans avec son mari à Los Alamos, tout près de l'endroit où le problème FPU a été conçu et découvert.

.....

On croirait que le nom de Mary Tsingou a été écrit à l'encre sympathique sur l'article fondateur. Il est temps de le faire réapparaître en reconnaissant sa contribution : parlons donc désormais du problème de Fermi-Pasta-Ulam-Tsingou (FPUT). ■

.....

Références

- 1• E. Fermi, J. Pasta, S. Ulam, M. Tsingou, "Los Alamos Scientific Laboratory report LA-1940" (1955). Publié plus tard par E. Segrè (éditeur), *Collected Papers of Enrico Fermi*, Vol. 2, U. Chicago Press, Chicago (1965).
- 2• N. J. Zabusky, M. D. Kruskal, "Interaction of 'Solitons' in a Collisionless Plasma and the Recurrence of Initial States", *Physical Review Letters* **15** (1965) 240.
- 3• T. Dauxois, M. Peyrard, *Physics of Solitons*, Cambridge University Press, New York (2006).
- 4• F. M. Izrailev, B. V. Chirikov, "Statistical properties of a non-linear string", *Soviet Physics-Doklady*, **11** (1966) 30.
- 5• *The Fermi-Pasta-Ulam Problem: A Status Report*, G. Gallavotti (Ed.), Springer (2008)
- 6• J. L. Tuck, M. T. Menzel, "The Superperiod of the Nonlinear Weighted String (Fermi-Pasta-Ulam) Problem", *Adv. Math.* **9** (1972) 399.
- 7• Le MANIAC, pour "Mathematical Analyzer, Numerical Integrator And Computer", fut construit en 1952 dans le cadre du projet Manhattan et servit notamment à mettre au point la première bombe à hydrogène. Il fut développé à la suite de la frustration de Richard P. Feynman (1918-1987) et Nicholas C. Metropolis (1915-1999), exaspérés par les appareils électromécaniques, lents, bruyants mais pourtant indispensables pour les calculs nécessaires au développement des bombes. Pour la petite histoire, le directeur du projet, Metropolis, aurait choisi le nom MANIAC en espérant mettre fin à la mode naissante de nommer les ordinateurs par des acronymes : cela eut pourtant l'effet totalement inverse ! Cet ordinateur effectuait de l'ordre de 10^4 opérations par seconde environ, à mettre en rapport avec les plus de 10^9 opérations effectuées aujourd'hui par le moindre ordinateur personnel.
- 8• T. Dauxois, "Fermi, Pasta, Ulam, and a mysterious lady", *Physics Today* **61**, 1 (2008) 55-57.
- 9• T. Dauxois, M. Peyrard, S. Ruffo, "The Fermi-Pasta-Ulam 'numerical experiment': history and pedagogical perspectives", *European Journal of Physics* **26** (2005) S3.
- 10• S. M. Ulam, *Adventures of a Mathematician*, Scribner, New York (1976).

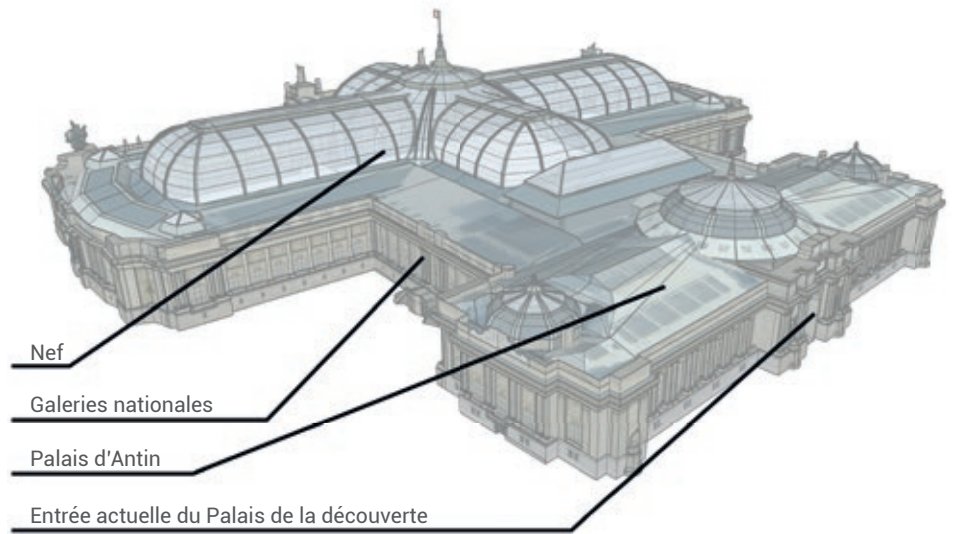
>>>

L'esprit Jean Perrin

Voici comment Jean Perrin présente le Palais dans la préface du livret de l'exposition [3] : « Nous avons observé qu'une Exposition des Techniciens où le rôle de la Découverte ne serait pas mis en lumière, serait comme une belle statue sans tête, et nous avons demandé s'il serait impossible d'ériger dans cet esprit un Palais de la Découverte. [...] Le *Palais de la Découverte*, provisoirement installé dans le Grand Palais, doit [...] faire comprendre au public que, dans le passé, mais aussi dans l'avenir, nous ne pouvons espérer rien de vraiment nouveau, rien qui change la Destinée qui semblait imposée aux hommes, que par la Recherche Scientifique et par la Découverte. [...] Dans ce palais, nous avons voulu réaliser une exposition vivante où sont, autant que possible, répétées de façon spectaculaire, avec les ressources les plus modernes, les découvertes fondamentales qui ont élargi notre intelligence [...], assuré notre emprise sur la matière [...], ou augmenté notre sécurité physiologique [...]. Les expériences sont refaites sous les yeux des visiteurs par des « démonstrateurs » qui les expliquent, s'aidant au besoin de phonogrammes synchronisés ou de films cinématographiques. En outre, de brefs commentaires [rédigés par les premiers de nos savants] relient les expériences, constituant pour chaque science un ensemble logique et indiquant les inventions et les applications pratiques jaillies de chaque découverte. »

Les objectifs

En montrant « la part déterminante que la Découverte de l'inconnu a prise dans la création de la civilisation » [3], Jean Perrin estime que le grand public « comprendra que cette Découverte doit être poursuivie, sans préoccupation pratique, précisément si l'on veut en tirer de grands résultats ; il comprendra par exemple (et tel commentaire y insistera) que ce n'est pas en se donnant pour problème de voir des projectiles dans le corps qu'on eut pu découvrir les Rayons X, ou que, de même, ce n'est pas en cherchant à transmettre la force à distance qu'Ampère eut pu découvrir l'électromagnétisme qui a permis cette transmission. En sorte que, par un retour singulier, l'intérêt *pratique* le plus pressant du Pays est de favoriser la recherche pure, *désintéressée*, poursuivie pour sa seule valeur intellectuelle et artistique. » [3].



2. Vue d'ensemble du Grand Palais.

Mais le Palais de la découverte est aussi un investissement pour l'avenir de la recherche : « on peut espérer que [...] il se rencontrera parmi les jeunes visiteurs [...] des esprits particulièrement aptes à la recherche, auxquels leur vocation se trouvera révélée. »

Le lieu

Dès les prémices du projet, le Palais de la découverte doit être pérenne, et cet objectif figure, notamment, dans le livret du Palais : « nous avons des raisons d'espérer que la noble ville de Paris, que l'État, regarderont comme de leur honneur et de leur intérêt d'édifier, de façon durable, sans doute, un Palais de la découverte, où de jeunes assistants ou chefs de travaux, eux-mêmes entraînés à la Recherche, et appartenant à l'Enseignement supérieur, donneront au peuple cette éducation qui lui manque et qu'il désire. »

La question du lieu est donc essentielle. « Il fera l'objet d'un bâtiment propre, construit pour l'occasion, ou à défaut, il occupera l'un des nouveaux bâtiments construits pour l'Exposition, comme le Palais de Chaillot » [5]. Mais finalement, pour des raisons budgétaires et par manque de temps, le Palais de la découverte investira un bâtiment existant, rescapé d'une précédente exposition universelle, celle de 1900 : le Grand Palais. Il en occupera 25 000 m² (sur 40 000), depuis le Palais d'Antin, à l'opposé de la nef, jusqu'aux galeries de la

nef sud (côté Seine) [6] (fig. 2). Il est organisé en huit sections : les mathématiques, l'astronomie, la physique, la chimie, la biologie, la médecine, la chirurgie et la microbiologie. La conception de chaque section est confiée à un comité directeur composé des grands scientifiques de l'époque. Par exemple, le président du comité de la section Physique est Jean Perrin lui-même, aidé (entre autres) par Charles Fabry pour la salle d'optique géométrique, Aimé Cotton pour la salle d'optique physique et la salle Ampère-Faraday, Paul Langevin pour la salle des phénomènes oscillants, ou encore Pierre Auger pour la salle des rayons cosmiques.

Le succès au rendez-vous

L'exposition universelle de 1937 accueille en six mois un peu plus de 31 millions de visiteurs. Mais le Palais de la découverte n'est pas dans l'enceinte de l'exposition, et il faut acquitter un droit d'entrée supplémentaire pour pouvoir le visiter : c'est ainsi que l'on recense en cette année 1937 plus de deux millions de visiteurs pour le seul Palais de la découverte. Un succès qui débouchera sur une réouverture rapide du Palais après la fin de l'exposition.

80 ans d'évolution

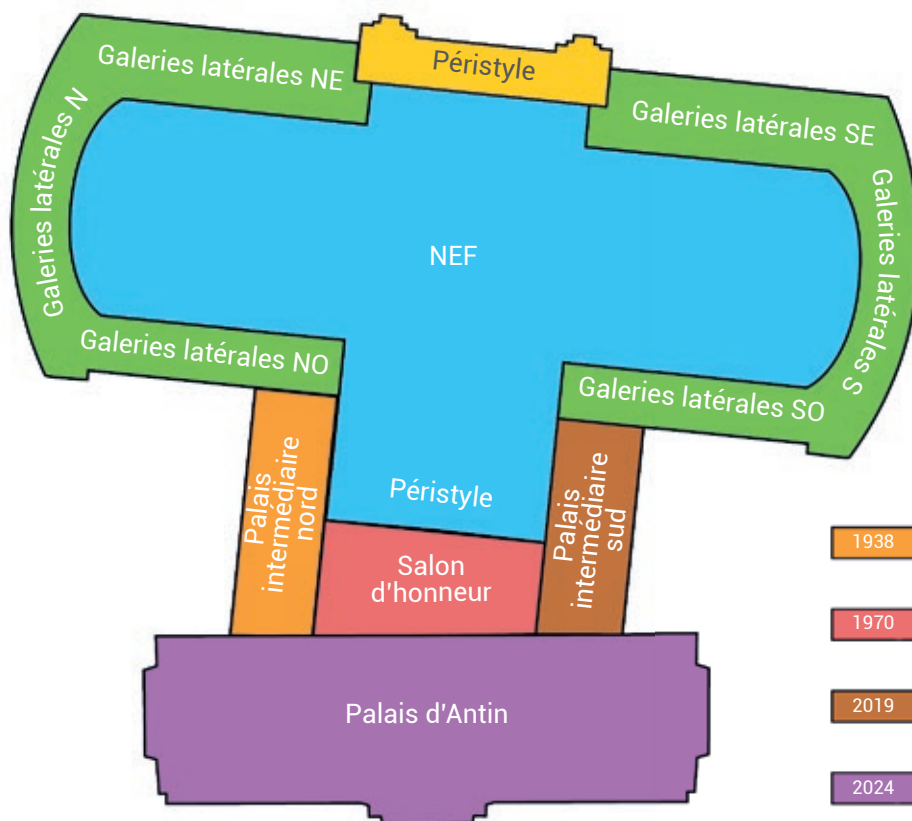
Le Palais de la découverte de 1938 n'est pas très différent de l'exposition de 1937. Aucune solution n'a été trouvée pour le

lieu, et il reste dans le Grand Palais. Il est toutefois confiné dans le Palais d'Antin, restituant les autres espaces aux artistes et aux salons. Sa surface est alors de 20 000 m² [7]. En 1997, elle n'est plus que de 12 695 m² [8], et aujourd'hui, elle est réduite à 11 000 m² [9] (fig. 3). Les surfaces perdues correspondent en général à la création de nouvelles offres dans le domaine des arts (comme la création des Galeries nationales en 1964) ou de l'évènementiel. Mais elles peuvent aussi résulter de la vétusté du bâtiment, qui nécessite de condamner des salles.

Les diminutions successives des surfaces du Palais de la découverte ont bien sûr entraîné des fermetures de salles et des aménagements des services d'accueil. Par exemple, le déplacement du planétarium du hall central vers le premier étage, en 1979, a entraîné la fermeture de la salle des nébuleuses et galaxies [8]. En 2010, c'est le salon d'honneur qui retourne dans le giron du Grand Palais, pour devenir un espace évènementiel de 1200 m² accessible par la nef. La maquette grandeur nature d'une usine électrique qu'il hébergeait est détruite [10]. Proportionnellement, la surface consacrée strictement à l'activité scientifique (donc hors services et espaces de circulation) diminue bien plus vite que la surface totale : elle est aujourd'hui de 7000 m². Plusieurs fois, il a été question de trouver un nouvel écrin pour le Palais de la découverte. Des projets de bâtiments voient même le jour (un exemple est montré dans la figure 4, p. 34), mais aucun n'aboutit.

Au cours de ses 82 ans d'existence, le Palais de la découverte a certes évolué, mais il a gardé l'esprit insufflé par Jean Perrin. La démarche scientifique, et en particulier la démarche expérimentale, reste au cœur de l'offre du Palais.

On peut cependant noter que les comités directeurs des sections composés de chercheurs ont malheureusement disparu. Le conseil scientifique du Palais a lui-même disparu en 2010 avec la création d'Universcience, qui englobe la Cité des sciences et de l'industrie située à La Villette et le Palais de la découverte (qui, depuis, ne dépend plus que de la seule tutelle du ministère de la Culture, et non plus de la cotutelle du ministère de la Recherche). Dans le conseil scientifique d'Universcience, les chercheurs sont largement minoritaires. Il existe un Comité d'Orientation du Palais de la



3. Évolution de la surface dédiée au Palais de la découverte au sein du Grand Palais. Par souci de synthèse, cette représentation est approximative : elle ne détaille ni la part occupée dans les différentes zones ni les différences entre rez-de-chaussée et étage. Le code couleur indique que le Palais occupait encore, au moins partiellement, cet espace cette année-là, mais qu'il l'a quitté avant l'année-repère suivante. Par exemple, le salon d'honneur était encore partiellement occupé en 1970, mais plus du tout en 2019.

découverte (COPADE), dont le rôle et la composition ne sont pas publiés.

Néanmoins, avec environ 500 000 visiteurs par an, le Palais peut être satisfait de ses résultats, puisque ses objectifs sont pleinement atteints. En particulier, une étude montre que 56 % des scientifiques parisiens de plus de 30 ans et 41 % des scientifiques parisiens de moins de 30 ans indiquent que le Palais de la découverte a joué un rôle dans leur vocation scientifique [11].

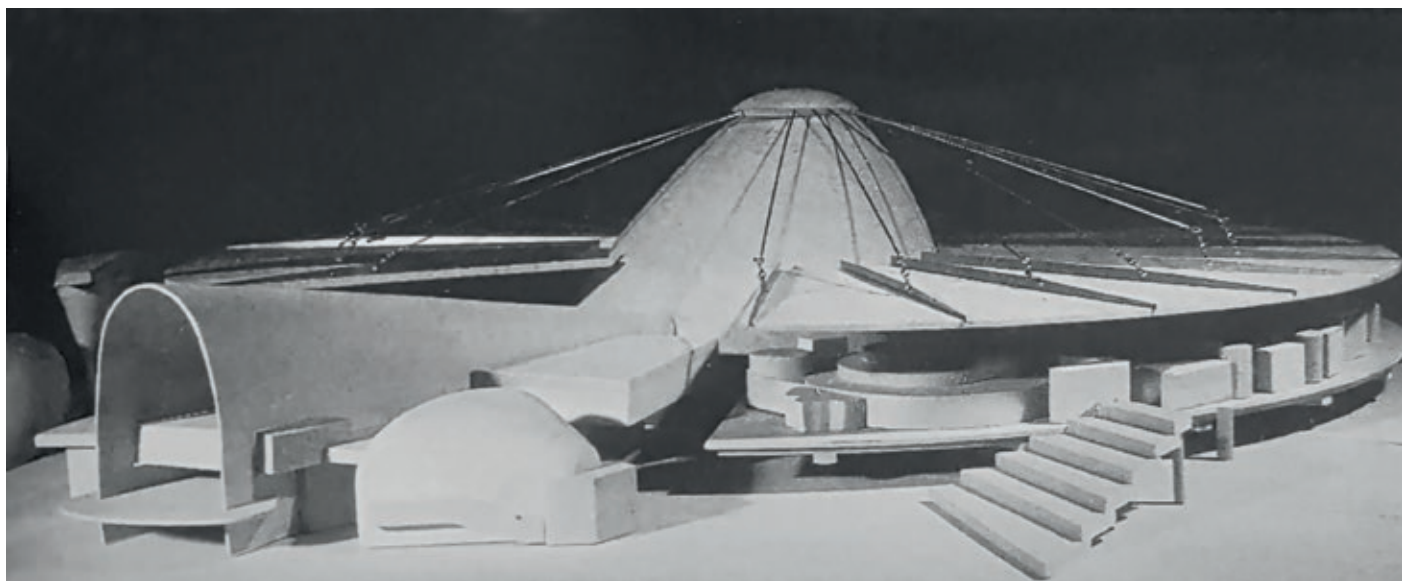
Faut-il en finir avec « l'esprit Jean Perrin » ?

La vision sans contraste que pouvait avoir en 1937 Jean Perrin à propos de l'apport des technologies dans notre société n'est plus vraiment à l'ordre du jour. En 1933, il écrit : « Rapidement, peut-être en quelques décades, [...] les hommes, libérés par la Science, vivront joyeux et sains, développés

jusqu'aux limites de ce que peut donner leur cerveau [...]. » [12] Ce discours peut sembler provocateur, mais il est sans aucun doute simplement naïf. Il arrive pendant l'âge d'or de l'évolution des techniques, « presque toutes apparues depuis moins d'un siècle [...], et qui semblent avoir réalisé ou dépassé les désirs que disaient nos vieux contes de fées » [3].

Mais malgré le contexte de l'exposition de 1937, l'objet du Palais de la découverte n'est pas les techniques, mais bien les sciences, voire la recherche scientifique, comme on a pu le voir plus haut. Dans le catalogue de l'exposition [13], Jean Perrin écrit « Nous avons d'abord voulu familiariser nos visiteurs avec les recherches fondamentales par où s'est créée la Science, en répétant journalièrement les grandes expériences auxquelles ont abouti ces recherches, sans en abaisser le niveau, mais pourtant accessible à un très grand nombre d'esprits.

>>>



4. Projet d'un nouveau bâtiment pour le Palais de la découverte, par Paul Nelson. *Cahiers d'art*, n°3-4 (1940).

>>>

Et nous avons voulu par-là répandre dans le public le goût de la culture scientifique, en même temps que les qualités de précision, de probité et de liberté de jugement que développe cette culture et qui sont utiles et précieuses à tout homme, quelle que soit sa carrière. »

Une approche plus que jamais d'actualité

Aujourd'hui, ces objectifs sont plus nécessaires que jamais. Bien plus qu'en 1937, notre société fait face à des enjeux dont les fondements scientifiques sont indiscutables. La connaissance complète des problématiques du climat, de l'énergie, du génie génétique, pour n'en citer que quelques-unes, nécessite – entre autres – d'en maîtriser les mécanismes et ce que nous en comprenons. Le citoyen, amené à prendre position sur ces enjeux, doit avoir accès à ces informations, et c'est bien d'ailleurs tout l'enjeu des mouvements *open source*. La crise sanitaire actuelle a montré que le fonctionnement même de notre démocratie au jour le jour peut être tributaire de données et de résultats scientifiques, au point que l'exécutif appuie ses décisions sur un conseil scientifique.

Lorsqu'il s'agit de science, l'information ne se résume pas aux résultats : elle doit contenir la méthode utilisée pour les obtenir, et les indications nécessaires pour les vérifier, voire les infirmer. Or pour les sciences

expérimentales, cela passe nécessairement par les expériences elles-mêmes. Et le public est demandeur : 93% de la population française exprime un désir de développer ses connaissances dans au moins un domaine scientifique [14]. Mais, en dehors des laboratoires, la plupart du temps inaccessibles au public, les lieux où l'on peut trouver le matériel et les compétences nécessaires à la réalisation de ces expériences sont rares et disséminés. L'esprit du Palais de la découverte, qui consiste à offrir à tous un lieu pour voir et faire la science, dans toute son étendue, est donc plus que jamais d'actualité.

Le projet de rénovation

Il faut bien sûr distinguer le projet architectural, qui implique l'ensemble du Grand Palais, du projet scientifique et culturel, qui ne concerne que le Palais de la découverte.

Le projet architectural

La rénovation architecturale du Grand Palais, qui englobe celle du Palais de la découverte, est attendue depuis de nombreuses années. Un rapport du Sénat de 2007 parle déjà d'un serpent de mer [11], et il est donc grand temps qu'elle soit mise en œuvre. Le projet lauréat [15] prévoyait de mutualiser les espaces communs du Palais de la découverte et des Galeries nationales grâce à la création d'une rue souterraine intérieure qui traverserait le

Palais de part en part, depuis le square Jean Perrin (l'entrée actuelle des Galeries nationales) jusqu'au jardin de la Reine, du côté du Cours la Reine et de la Seine. Cette rue accueillerait la billetterie, une boutique-librairie, des salles consacrées à l'histoire du Grand Palais, etc. Cette rue des Palais desservirait d'un côté le Palais de la découverte, et de l'autre les Galeries nationales. En septembre 2020, ce projet est officiellement annulé, au profit d'un projet dans le même esprit que le précédent. La rue souterraine devient une « place centrale » avec les mêmes fonctions, et le budget est inchangé.

Pour le Palais d'Antin, s'ajoute à la restauration proprement dite une remise en valeur des décors 1900. En 1937, l'esthétique intérieure d'origine du Palais d'Antin ne correspond pas aux canons de l'époque et à l'utilisation qu'on veut en faire. On cache donc les mosaïques ou les plafonds verriers sous des moquettes ou des faux-plafonds. Le projet de restauration initial prévoyait « la restitution à l'identique et dans les règles de l'art des décors disparus » [15], mais aussi de dégager les ouvertures des espaces (c'est-à-dire d'abattre les cloisons existantes) « afin de pérenniser la séquence lumineuse de l'enfilade des trois halls (la rotonde centrale et les deux ailes) » [15].

Cette rénovation, qui semble toujours d'actualité dans le nouveau projet [16], aura un impact considérable sur l'aménagement

intérieur du Palais de la découverte. La diminution de la surface dédiée à l'offre permanente reste modérée (de 7135 m² à 6925 m² [9]). Mais avec la destruction des cloisons actuelles et l'élargissement des espaces de circulation, il y a fort à parier que la surface disponible pour les expositions elles-mêmes soit bien plus faible. On peut estimer l'ampleur de cette perte à partir de la jauge du futur Palais : le nombre de personnes susceptibles d'être accueillies simultanément dans le Grand Palais (hors nef) passera de 11 300 à 10 900 personnes. Comme il est par ailleurs annoncé que les Galeries nationales verront leur surface augmenter à 3900 m², on peut estimer que le nombre de personnes pouvant être accueillies par le Palais de la découverte baissera de 20%, ce qui donne une estimation de la réduction des surfaces ouvertes au public. Certes, le Palais gagne par ailleurs un plus grand auditorium, des espaces d'accueil (mutualisés) plus confortables, voire même agrandi son offre à travers une Galerie des enfants ; mais la surface consacrée à ce qui lui donne son caractère unique, c'est-à-dire la reproduction des expériences scientifiques, diminue encore. Cette diminution vient s'ajouter aux réductions de surface successives, alors que cette rénovation aurait pu être l'occasion de lui redonner une partie de son ampleur initiale. C'est d'ailleurs le cas pour les autres parties du Grand Palais : les Galeries nationales voient leur surface augmenter de 30%, et les surfaces locatives du Grand Palais (la nef et ses galeries, le salon d'honneur, etc.) s'accroissent de 24% [15].

Le projet scientifique et culturel du futur Palais : préserver « l'esprit Jean Perrin »...

Le projet d'aménagement et de restauration du Grand Palais annonce la couleur [15] : « La rénovation du Palais de la découverte n'est pas que celle de ses murs ; [...] les travaux constituent une opportunité unique d'actualiser la proposition au public du Palais de la découverte en inscrivant l'institution dans le XXI^e siècle tout en préservant tant son âme que l'esprit du lieu. » Le projet identifie parfaitement les principes qui font l'identité du Palais : « Il s'agira de renforcer les concepts à l'origine du Palais de la découverte en disposant d'un lieu qui mette les citoyens en contact avec les sciences fondamentales, lieu où le vecteur principal d'interaction sera la médiation humaine, où l'on découvrira la science en

train de se faire, où place sera faite à l'émerveillement. »

Pour « montrer la science », le Palais s'appuie sur le binôme médiateur - matériel expérimental. L'un ne va pas sans l'autre : le matériel expérimental est trop spécialisé pour être livré à la manipulation du public, et le médiateur ne peut rien montrer sans ce matériel. Si la présence des médiateurs n'est pas remise en question, leur rôle et le matériel mis à leur disposition semblent bien devoir évoluer fortement dans le projet du Palais 2024. Mais avant d'examiner ces aspects, regardons comment le projet fait évoluer les objectifs du Palais.

... mais ne pas transmettre les savoirs !

En contradiction directe avec le fonctionnement de la recherche, « Le Palais de la découverte [...] sera consacré à la science prise globalement, donc à l'action de découvrir plutôt qu'à la présentation de découvertes réalisées par d'autres dans le passé. » [17]. Le projet scientifique du futur Palais oppose la découverte contemporaine à celles réalisées dans le passé, comme si les grands scientifiques ne progressaient pas « en montant sur les épaules des géants », pour reprendre le mot d'Isaac Newton. Il a donc l'ambition de faire découvrir la science contemporaine sans en aborder les bases, construites au fil des siècles.

Le projet scientifique et culturel (PSC) du Palais 2024 [17] suit la même logique. Il a été rédigé par la direction d'Université et l'agence d'ingénierie culturelle ABCD, et non, comme on aurait pu l'imaginer, par un comité comprenant un nombre significatif de scientifiques. Il annonce que le « dessin n'est pas de combler les "lacunes" scientifiques [des] visiteurs. [...] Il ne sera pas un lieu destiné à compenser ou à combler le déficit en informations scientifiques des visiteurs, mais plutôt un lieu qui travaille avec les connaissances et l'intelligence du visiteur. »

Pour décider de cette stratégie, le PSC fait référence au *deficit model* : « Il faut cependant noter que les médiations privilégiées des modèles d'interaction essentiellement descendants, malgré les séquences de questions-réponses, et reposent sur le postulat, désormais contesté, du *deficit model*. » Rappelons que le modèle du déficit de connaissances attribue l'hostilité éventuelle du public vis-à-vis de la science à un défaut de connaissances, qu'il suffit donc de combler pour le faire changer d'avis [18].

Ce modèle est aussi invoqué dans les problèmes de société liés à la science. Plusieurs études ont montré que ce modèle est trop simpliste, et qu'il ne suffit pas de combler ce déficit pour obtenir une adhésion à ces technologies controversées, surtout quand elles présentent des dangers réels. Mais elles ont aussi montré que « fournir des informations fiables de manière accessible – en d'autres termes, combler le déficit des connaissances pertinentes – est une condition préalable essentielle à la fois à un dialogue sain et à une prise de décision efficace. » [19]. En l'absence d'opportunité de combler proprement ce déficit, c'est le modèle de la « rationalité peu informée » qui l'emporte : l'opinion se construit à partir d'informations superficielles – et pas nécessairement pertinentes – glanées çà et là, et notamment aujourd'hui sur le *web* et les réseaux sociaux [18].

La référence au modèle du déficit dans le PSC est révélatrice du virage qui pourrait s'opérer : l'objectif du Palais ne serait plus de faire découvrir les sciences, mais de convaincre que leurs applications sont nécessairement bénéfiques. Plutôt que de lui transmettre un savoir, il faudrait dialoguer avec le public en usant d'autres arguments que scientifiques. Certes, les débats sont nécessaires, mais ils doivent venir en complément de la « découverte », et non la remplacer. On ne peut qu'espérer que cette vision de la science, très éloignée de la démarche scientifique et même de l'éthique de la recherche, ne sera pas mise en œuvre dans le futur Palais.

>>>



>>>

Rapprocher le Palais du monde de la recherche

On l'a vu plus haut : le Palais d'aujourd'hui s'est éloigné du monde de la recherche, en excluant les chercheurs de son fonctionnement. Mais, d'après le PSC, « en 2024, le Palais de la découverte sera le lieu privilégié, et unique en son genre, de mise en contact et en conversation du public avec la recherche contemporaine. Il s'intéressera principalement aux sciences fondamentales, aux questionnements féconds qui les traversent ainsi qu'à leurs méthodes, à leur histoire comme à leurs nouveaux développements. » [17]. « Les différents espaces du Palais de la découverte auront pour vocation d'inviter les visiteurs à investir pleinement la science contemporaine et surtout la recherche. [...] La présentation de ces questions constituera un processus riche, qui devra aussi et nécessairement véhiculer les connaissances de base nécessaires à la compréhension des problématiques en jeu. » Notons au passage la contradiction de cette dernière phrase avec le dessein de ne pas s'attaquer aux lacunes scientifiques des visiteurs.

Montrer au public la recherche contemporaine est bien au cœur des missions du Palais, mais Jean Perrin allait plus loin : il voulait que les chercheurs prennent une part active dans le fonctionnement du Palais – ce qui n'est plus le cas. Le PSC le reconnaît d'ailleurs implicitement, en notant que « les expositions permanentes, à l'exception de la dernière proposée, consacrée à l'informatique et aux sciences du numérique, n'abordent aucune des découvertes scientifiques du XXI^e siècle » [17]. Malheureusement, rien ne dit que cela changera dans le Palais 2024. En revanche, le Palais met en contact public et chercheurs : il a mis en place avec succès, il y a plus de dix ans, le programme « 1 chercheur.e, 1 manip », qui répond précisément à cet objectif (fig. 5). Dans le Palais 2024, ce programme sera allégé : rebaptisé « 1 chercheur.e, 1 question », sans doute pour faire l'économie de la gestion des « manip ». Bien que cela n'affaiblisse peut-être pas la présence de la recherche contemporaine au sein de l'offre du Palais, cela diminue la portée du procédé. Car la « manip », le dispositif expérimental au cœur de la démarche expérimentale, permet véritablement de montrer la science et la démarche scientifique. Cette évolution du programme « 1 chercheur.e, 1 manip » semble d'ailleurs être une conséquence du changement de paradigme voulu pour le



5. 1 chercheur.e, 1 manip. Dix milliards de watts dans un fil de lumière : le laser femtoseconde.

© Palais de la découverte

Palais, comme on le verra dans le paragraphe suivant.

Moins de manip...

Ce qui rend le Palais d'aujourd'hui unique, c'est le matériel expérimental dont il dispose. Grâce à lui, les médiateurs du Palais sont capables d'illustrer par des expériences parfois spectaculaires des milliers de lois ou de concepts scientifiques fondamentaux. Le public « voit » alors littéralement la science en train de se faire sous ses yeux : il peut parfois vérifier par l'expérience des prédictions découlant de constructions mathématiques, et parfois infirmer par l'expérience des hypothèses dictées par le « bon sens ». Car c'est bien ainsi que se fait la science, à travers ce qu'on appelle la démarche scientifique.

La place consacrée aux manip est étonnamment faible dans le PSC, et le peu qu'on y trouve et ce qu'on peut en déduire est alarmant. « Chaque discipline scientifique [...] présente au Palais de la découverte sera ainsi identifiée, portée et symbolisée par une icône. [...] Elle sera associée à un espace de présentation avec ou non, selon les besoins, des paillasse permettant d'ajouter d'autres démonstrations à l'animation principale. » Il convient d'ajouter que dans la partie en visite libre, des « îlots de curiosité » pourront accueillir quelques manip mécaniques, en complément « des éléments recourant aux technologies numériques, des audiovisuels ou des objets techniques ou scientifiques anciens ou contemporains ». On voit donc se dessiner un appauvrissement drastique des manip, avec pour chaque discipline

un espace unique, présentant une icône unique et quelques petites manip sur paillasse. L'icône pourrait être, pour les sciences expérimentales, une manip spectaculaire, mais parmi toutes celles présentes actuellement au Palais, il ne faudra en garder qu'une seule.

... mais plus de numérique

Il est souvent fait allusion dans le PSC au rôle que le numérique pourrait avoir dans le renouvellement du Palais, mais sans détailler ce rôle. Avec l'évolution rapide de ces outils, on peut comprendre que ces détails viendront plus tard, mais il faudra être vigilant à ce que ces outils viennent en complément pédagogique de la science, et non en remplacement. Car remplacer une manip par sa représentation virtuelle, c'est bien remplacer la science au mieux par une représentation de la science, ou pire par une fiction.

Ce projet peut-il encore évoluer ?

Dès les premières annonces concernant ce projet de rénovation, la commission Culture Scientifique de la SFP a multiplié les contacts avec les personnels du Palais et la direction d'Universcience, afin de tenter d'appréhender les objectifs des uns et des autres. Le dernier rendez-vous important était le 31 janvier 2020 : la présidence de la SFP (Catherine Langlais et Guy Wormser), accompagnée de représentants de la commission Culture Scientifique (Daniel Hennequin, Hélène Fischer, Titaina Gibert),

ont rencontré la direction d'Universcience (Bruno Maquart, Michèle Antoine, Antonio Gomes da Costa).

Concernant le projet architectural, et donc essentiellement la répartition des surfaces entre les différents utilisateurs du Grand Palais, les raisons évoquées pour le *statu quo* sont que (i) la décision est ancienne (2012-2013), antérieure aux administrations actuelles, (ii) le projet architectural est trop avancé, avec notamment des appels d'offre déjà en cours et (iii) une surface plus grande serait difficile à gérer à budget

constant. Au moins pour les deux premiers points, les évolutions récentes du projet architectural ont montré que rien n'est impossible. Et de toutes façons, on peut noter que même à l'intérieur de ces contraintes, il subsiste de grandes marges de manœuvre : des espaces communs ou en contact direct avec le Palais d'Antin pourraient être réattribués à la science, et le budget pourrait être réévalué.

Concernant le projet scientifique, il est confirmé que pratiquement toutes les manips actuelles seront détruites, essentiel-

lement parce qu'elles ont mal vieilli ou ne sont plus aux normes. Il faut donc bien prendre conscience que le point de départ du projet scientifique est un Palais de la découverte vide : tout est donc possible !

L'avenir du Palais de la découverte est donc entre les mains de son personnel, de la direction d'Universcience, mais aussi de la communauté scientifique et du grand public, qui se mobilisent pour qu'un musée vivant de la science et de la recherche scientifique subsiste en France [1]. ■

Références

- 1• Voir notamment la pétition qui a recueilli plus de 23 000 signatures (octobre 2020) : <https://cutt.ly/PetitionPalaisdeLaDecouverte>
- 2• « Paris 1937, l'exposition internationale des arts et techniques », <https://cutt.ly/cinearchives-recherche>
- 3• J. Perrin, « Préface », *Livret du Palais de la découverte* (1937). <https://cutt.ly/gallica-bnf-fr6k313536h>
- 4• A. Bergeron et C. Bigg, « D'ombres et de lumières. L'exposition de 1937 et les premières années du Palais de la découverte au prisme du transnational », *Revue germanique internationale*, **21** (2015). URL : <http://journals.openedition.org/rgi/1529>
- 5• *Masses et culture de masse dans les années trente*, sous la direction de Régine Robin, Les Éditions Ouvrières, Paris (1991)
- 6• « Organisation du Palais de la découverte », *Livret du Palais de la découverte* (1937). <https://cutt.ly/gallica-bnf-fr6k313536h>
- 7• « Le palais des Arts s'ouvre aux Sciences : Le palais de la découverte », <https://cutt.ly/artsandculture-le-palais-des-arts-souvre-aux-sciences>
- 8• « Le Palais de la découverte », rapport du Comité National d'Évaluation (1997). www.cne-evaluation.fr/WCNE_pdf/Palais.pdf
- 9• « Un nouveau Palais de la découverte en 2024. Questions / réponses ». www.palais-decouverte.fr/fr/au-programme/evenements-palais/un-nouveau-palais-de-la-decouverte-en-2024/questions-reponses/
- 10• « Le Grand Palais retrouve son salon d'honneur », *Le Parisien* (13 juin 2012). www.leparisien.fr/paris-75/le-grand-palais-retrouve-son-salon-d-honneur-13-06-2012-2045661.php
- 11• P. Adnot, « Le Palais de la découverte : un condensé de dysfonctionnements administratifs et politiques », rapport d'information fait au Sénat (2007). www.senat.fr/rap/r06-354/r06-354_mono.html#toc12
- 12• J. Perrin, « La nouvelle espérance » dans *La recherche scientifique*, Hermann (1933), réédité dans *La science et l'espérance*, PUF (1948). Cité dans www.nicolasbouleau.eu/nous-avons-besoin-de-depasser-a-la-fois-la-science-conquerante-et-la-science-spectatrice/#ftn6, et dans « Science nomologique et science interprétative », ISTE Éditions (2018).
- 13• J. Perrin, « Exposition Internationale des arts et techniques dans la vie moderne », catalogue d'exposition, tome 4 (1937), ministère du Commerce et de l'Industrie, p. 216, cité dans A. Aron et E. Ioannidou, « De la démonstration à l'exposé au Palais de la découverte », *La Lettre de l'OCIM*, **171** (2017) 15-21. <http://journals.openedition.org/ocim/1775>.
- 14• « La curiosité scientifique des Français et leur désir de développer leurs connaissances », Rapport du CREDOC (2013). <https://cutt.ly/credoc-pdf-R289>
- 15• « Aménagement et restauration du Grand Palais », dossier de presse (2018). <https://cutt.ly/palais-decouverte-fr-amenagement-et-restauration-du-Grand-Palais-fevrier-2018-pdf>
- 16• « Un meilleur projet pour le Grand Palais », *La Tribune de l'art* (octobre 2020). www.latribunedelart.com/un-meilleur-projet-pour-le-grand-palais
- 17• « Le Palais 2024 - Projet scientifique et culturel », janvier 2019. Une synthèse est disponible ici : <https://cutt.ly/palais-decouverte-evenements-nouveau-palais-Projet-scientifique-et-culturel-pdf>. Site de l'agence ABCD : www.abcd-culture.com/palais-de-la-decouverte-psc/
- 18• Voir par exemple D. A. Scheufele, "Messages and heuristics: how audiences form attitudes about emerging technologies" dans *Engaging Science: Thoughts, deeds, analysis and action*, The Wellcome Trust (2006). Disponible sur : www.researchgate.net/publication/224818373_Messages_and_heuristics_How_audiences_form_attitudes_about_emerging_technologies
- 19• "The case for a 'deficit model' of science communication", editorial de *SciDev.Net*. www.scidev.net/global/communication/editorials/the-case-for-a-deficit-model-of-science-communic.html Voir aussi P. Sturgis et N. Allum, "Science in society: re-evaluating the deficit model of public attitudes", *Public understanding of science*, **13** (2004) 55-74. <http://repository.essex.ac.uk/9772/1/fulltext.pdf>

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

Madame la ministre,

Les sociétés savantes signataires prennent acte des annonces du président de la République et de vous-même, insistant sur l'importance de la recherche pour la société en ces temps difficiles, et des annonces budgétaires s'y référant. Nous avons par ailleurs noté votre engagement à régler la question de la prolongation des contrats doctoraux et autres contrats courts du fait de l'épidémie [de Covid-19]. Nous souhaitons à ce sujet que l'État déclare de la façon la plus claire son engagement à financer ce surcote pour tous les contrats relevant de sa compétence. Nous espérons que ceci sera mis en pratique au niveau des personnes intéressées le plus rapidement possible.

Nous souhaiterions attirer ici votre attention sur le fait qu'il serait extrêmement dommageable pour la recherche française que le budget supplémentaire envisagé vienne mettre en danger le nécessaire équilibre entre la recherche de base au long cours, principalement financée par les organismes nationaux et les universités, et la recherche sur projets, principalement financée par l'ANR [l'Agence nationale de la recherche]. La crise actuelle a encore une fois démontré la nécessité absolue d'un spectre le plus large possible de recherches à long terme, non seulement essentielles pour l'avancée générale des connaissances, mais également indispensables pour pouvoir être à même de répondre le mieux possible aux crises du futur, dont nous ignorons tout encore et pour lesquelles la recherche sur projets ne pourra jamais fournir des réponses en temps utile. Cette indispensable recherche de base ne pourra se développer sans un accroissement significatif des moyens humains et financiers des organismes nationaux et des universités.

Une augmentation du budget de l'ANR n'aura aucun effet sur les trois problèmes essentiels dont souffrent les laboratoires aujourd'hui, ainsi que leurs directeurs et directrices viennent de vous l'écrire : le manque de personnel permanent, le manque de crédits récurrents et le manque de visibilité à moyen et long terme de leur stratégie de recherche. Ces problèmes sont liés car, sans personnel permanent en nombre suffisant, sans perspectives attrayantes pour leur carrière, sans recrutement plus important de jeunes chercheuses et chercheurs, de jeunes enseignantes-chercheuses et de jeunes enseignants-chercheurs, sans attention particulière à la place des femmes dans l'ensemble du système, il n'y aura pas la possibilité de mettre en pratique une stratégie nationale de recherche à long terme.

L'objectif d'augmenter le taux de succès des appels d'offres ANR est louable, mais il ne doit pas être atteint par la seule augmentation mécanique du budget de l'ANR qui, par nature, ne poursuit pas une politique scientifique sur le long terme, à dix ans ou plus. Une répartition plus stratégique des ressources supplémentaires permettrait d'augmenter ce taux de succès en diminuant le nombre de projets soumis, puisque nombre d'entre eux s'inscriraient alors dans les politiques scientifiques financées par les grands organismes nationaux et les universités. Ceci permettrait en outre de diminuer le temps beaucoup trop important passé aujourd'hui par les chercheuses et les chercheurs pour le montage, la gestion ou l'évaluation de projets à court terme, au lieu de se consacrer à la recherche proprement dite.

Dans le cadre de l'impulsion que le gouvernement a déclaré vouloir donner en faveur de la recherche, il nous paraît indispensable que ces remarques soient prises en compte, et nous serions heureux de pouvoir les développer directement avec vous.

Nous vous prions d'agréer, Madame la ministre, l'expression de notre considération distinguée.

Cette lettre a également été envoyée en copie aux principaux acteurs de l'enseignement supérieur et de la recherche, ainsi qu'aux conseillers de l'Élysée et de Matignon.

La liste des 36 sociétés savantes signataires peut être trouvée à l'adresse : www.sfpnet.fr → Prises de position → Lettre commune sur la LPPR adressée à Madame la Ministre

Rencontre avec la ministre de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation

Une délégation de 26 représentant·e·s de sociétés savantes françaises s'est rendue le 27 juillet 2020 au ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, à l'invitation de la ministre Madame Frédérique Vidal. Cette invitation faisait suite à la lettre envoyée le 5 juin (voir p. 38).

Lors d'une réunion préparatoire, trois porte-paroles avaient été désignés pour traiter respectivement :

- des modalités du **financement de la recherche** (Guy Wormser, vice-président de la Société Française de Physique – SFP),
- des **aspects budgétaires** (Patrick Lemaire, président de la Société Française de Biologie du Développement - SFBD),
- des **ressources humaines** (Florence Hachez-Leroy, présidente du Comité d'information et de liaison pour l'archéologie, l'étude et la mise en valeur du patrimoine industriel – CILAC).

La réunion s'est tenue pendant deux heures, en présence de la ministre et de plusieurs membres de son cabinet.

En introduction, Catherine Langlais, présidente de la SFP, a insisté sur le caractère spécifique des sociétés savantes et leur grande utilité potentielle comme « corps intermédiaire » dans un contexte où la loi proposée suscite de très nombreuses réactions négatives dans la communauté. Elle a souligné que l'effort budgétaire conséquent que prévoit cette loi en faveur de la recherche est jugé le plus souvent insuffisant au regard de l'ambition affichée et de l'inflation sur la période.

Voir le compte-rendu complet de la réunion sur le site de la SFP :

www.sfpnet.fr → Prises de position

→ Rencontre avec Frédérique Vidal au sujet de la loi LPPR



© Velotango (Wikimedia Commons)

Françoise Combes, médaille d'or 2020 du CNRS

La médaille d'or du CNRS a été attribuée cette année à l'astrophysicienne Françoise Combes.

Professeure au Collège de France à la chaire « Galaxies et cosmologie » et membre de l'Académie des sciences, Françoise Combes poursuit ses recherches au Laboratoire d'études du rayonnement et de la matière en astrophysique et atmosphères (LERMA), rattaché à l'Observatoire de Paris. Ses activités de recherche sont consacrées à la formation et l'évolution des galaxies dans un contexte cosmologique, étudiées à la fois par des observations et des simulations numériques. Elle s'intéresse aux différents modèles de matière noire, et aussi à l'une des alternatives, la gravité modifiée. Elle a découvert un grand nombre de molécules dans le milieu interstellaire.

Françoise Combes est lauréate de nombreux prix et distinctions scientifiques. Elle est l'auteur de plusieurs livres. Elle a été présidente de la Société française d'astronomie et d'astrophysique (SF2A) et est éditrice de la revue scientifique européenne *Astronomy and Astrophysics*.

Membre de la Société Française de Physique, elle en a présidé la journée grand public « Connaissance de l'Univers : où en sommes-nous ? », qui s'est tenue à l'ENS Paris le samedi 25 janvier 2020, à l'issue de l'Assemblée générale. Françoise Combes est membre du comité de rédaction de notre revue *Reflets de la physique*, pour laquelle elle a suscité de nombreux articles et en a écrit elle-même plusieurs.

Cette médaille d'or récompense une physicienne dont les travaux ont contribué de manière exceptionnelle au rayonnement de la recherche française.



De gauche à droite : Roger Penrose, Reinhard Genzel et Andrea Ghez.

Prix Nobel de physique 2020

Le prix Nobel de physique 2020 récompense trois spécialistes en cosmologie pour leurs découvertes autour de l'un des phénomènes les plus exotiques de l'Univers, les trous noirs.

La moitié du prix est attribuée au mathématicien et physicien britannique Roger Penrose (Université d'Oxford), pour avoir prouvé que la formation des trous noirs est une conséquence de la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein.

L'autre moitié du prix est attribuée conjointement à l'Allemand Reinhard Genzel (directeur de l'Institut Max Planck pour la physique

extraterrestre à Munich) et à l'Américaine Andrea Ghez (professeure d'astronomie à l'Université de Californie à Los Angeles), pour la découverte d'un objet compact supermassif au centre de notre Galaxie, Sag A*, dont ils ont imagé l'environnement.

Un article leur sera consacré dans le prochain numéro de *Reflets de la physique*.

Retour sur la Soirée Jean Perrin au Palais de la découverte

Le 9 octobre 2020, la Société Française de Physique (SFP) a célébré, en partenariat avec le Palais de la découverte, le cent-cinquantième anniversaire de la naissance de Jean Perrin. À cette occasion, elle a décerné son prix Jean Perrin 2019 à Hélène Fischer.

Après une introduction de Bruno Maquart, président d'Université, de Catherine Langlais, présidente de la SFP et d'Alain Schuhl, directeur général délégué à la science du CNRS, Denis Guthleben, attaché scientifique au Comité pour l'histoire du CNRS, a retracé de façon passionnante le parcours de Jean Perrin (1870-1942) et ses contributions si importantes à la structuration de la recherche en France. En plus d'avoir reçu le prix Nobel de physique en 1926 pour « avoir validé expérimentalement l'hypothèse atomiste » [1], Jean Perrin est à l'origine de la création du Palais de la découverte en 1937 (voir article pp. 31-37), ainsi que du CNRS en 1939. Quelle émotion de le réentendre, grâce à un film d'archives, défendre ses convictions pour la recherche fondamentale et pour la transmission des savoirs !

Le prix Jean Perrin 2019 de popularisation de la science de la SFP, a ensuite été décerné à la personnalité forte et très attachante d'Hélène Fischer, enseignante-chercheuse à l'Institut Jean Lamour (UMR CNRS 7198) de l'université de Lorraine (voir l'article dans *Reflets de la physique* n°66, p. 36). Hélène Fischer a été récompensée pour ses nombreuses actions de diffusion des connaissances vers un très large public : en particulier pour son exposition « Magnétique » [2] – présentée à quelques mètres de la salle de conférences où nous nous trouvons – ainsi que pour son investissement de longue date pour les actions de culture scientifique au sein de la SFP. Le jury a désigné à l'unanimité la lauréate, vu l'enthousiasme provoqué par son dossier, comme l'ont indiqué le président du jury, Jean-Michel Courty, et Catherine Langlais, en lui remettant son prix, son diplôme et sa médaille !



Hélène Fischer devant la maquette présentant le principe d'un ralentisseur à courants de Foucault.

Hélène Fischer a démontré lors de son discours l'étendue des réflexions préalables qu'il était nécessaire de mener pour réussir à rendre compte auprès du grand public d'un phénomène aussi complexe et abstrait que le magnétisme. Cette démarche très aboutie a permis de dépasser le frein constitué par l'image préalable qu'un grand nombre de personnes pouvaient avoir du magnétisme, notamment avec sa possible connotation mystique.

Enfin, pour clôturer la soirée, les participants ont eu le plaisir de visiter l'exposition très pédagogique d'Hélène Fischer, « Magnétique », avant une longue fermeture du Palais pour travaux. La progression à travers l'exposition permet de se familiariser de façon très interactive avec les principes de base du magnétisme, avant de découvrir les avancées les plus récentes de la recherche dans ce domaine et ses nombreuses applications.

Le seul regret que l'on peut avoir est d'avoir dû se tenir à distance respectable les uns des autres, mesures sanitaires obligent !

Guy Wormser

Vice-président de la Société Française de Physique

La soirée (hors introduction) est accessible en ligne sur YouTube : <https://cutt.ly/soireejeanperrin>

[1] H. Kubbinga, « Éloge de Jean Perrin », *Reflets de la physique*, 38 (2014) 19-31.

[2] Exposée initialement à Nancy, voir H. Fischer, « MAGNETICA, une expo attirante », *Reflets de la physique*, 57 (2018) 32-35.



Le public de l'exposition « Magnétique » du Palais de la découverte effectuant lui-même les expériences présentées sur l'îlot 3, intitulé « Magnétisme pour quoi faire ? ».

La Nuit des Temps en préparation

Une manifestation grand public, organisée par la Société Française de Physique en partenariat avec le CNRS, le CEA, la SFO et la SCF.

Après la **Nuit de la Lumière** en 2015, la **Nuit des ondes gravitationnelles** en 2017 et la **Nuit de l'Antimatière** en 2019, la **Nuit des Temps** se tiendra le mercredi 10 mars 2021 dans plusieurs villes de France en simultanément.

Comme lors des éditions précédentes, l'opération consiste en une **mobilisation des scolaires** autour du thème du Temps, ainsi qu'en une **soirée festive à fort retentissement**.



Les concours

Les différents concours lancés à l'occasion de la **Nuit des Temps** ont pour objectif de **sensibiliser les élèves** à la richesse et à la diversité des **différents aspects scientifiques** liés au temps et à sa nature.

Les élèves, **du primaire aux classes préparatoires**, isolés ou en groupe, avec ou sans l'aide de leurs professeurs, sont encouragés à répondre à un ou plusieurs de ces concours qui se dérouleront jusqu'au mois de février 2021.

QUATRE TYPES DE CONCOURS SONT PROPOSÉS : expérimentaux, littéraires, artistiques et philosophiques.

Pour participer, l'inscription à ces concours est obligatoire. Elle est ouverte jusqu'au 20 décembre 2020 sur www.sfpnet.fr/la-nuit-des-temps-2021.

N'hésitez pas à en parler dans les lycées ou collèges autour de vous !

À gagner : des voyages, des visites de sites ou de laboratoires emblématiques de la recherche de pointe liée au temps, ainsi que des abonnements à des revues de vulgarisation scientifique. Les projets gagnants seront largement exposés.

Soirée festive

D'autre part, une **soirée à fort retentissement** sera organisée à Paris au cinéma « Le Grand Rex » (le plus grand cinéma d'Europe, 2700 places) et dans plus de 25 villes en France – un record dû à la nature très interdisciplinaire du Temps – toutes interconnectées !

Le programme de la soirée, qui rassemblera plusieurs milliers de personnes au total, consistera en une **conférence scientifique**, suivie d'un **débat**, de **visites virtuelles de sites ou de laboratoires emblématiques** consacrés au Temps, de **jeux-quiz** sur ce thème, et de **tables rondes très pluridisciplinaires** sur les différents aspects du Temps.

Une incertitude plane bien sûr encore sur la possibilité d'organiser cette soirée en présentiel, mais des variantes virtuelles sont prévues pour que la fête ait lieu, même dans des conditions sanitaires difficiles.

Le palmarès des concours sera également remis à cette occasion !

www.sfpnet.fr/la-nuit-des-temps-2021

Appel à suggestions pour l'anniversaire de la SFP
www.Forum.sfpnet.fr

La Société Française de Physique aura 150 ans en 2023 : cet anniversaire sera célébré tout au long de l'année par un grand nombre de manifestations organisées dans toute la France.

Une conversation a été ouverte sur le **nouveau forum de discussion de la SFP** www.Forum.sfpnet.fr (accessible à tous, membres et non-membres) pour **recueillir vos commentaires et suggestions** à ce sujet. Ne vous censurez pas !

La SFP a par ailleurs mis sur pied un comité d'organisation dont font partie les responsables de divisions, de sections locales et de commissions de l'association. N'hésitez pas également à vous rapprocher d'eux pour en discuter si vous le souhaitez.

Revue de l'American Physical Society : la qualité pour un juste prix !

La Société américaine de physique (APS) est la plus grande société de physique dans le monde. Ses valeurs reflètent celles des communautés scientifiques de cette discipline, partagées partout, en particulier par les Sociétés Françaises de Physique (SFP) et d'Optique (SFO). L'APS est aussi une maison d'édition : les seize revues publiées sous son autorité, ainsi que sa plateforme en ligne PROLA, sont d'une qualité exceptionnelle. Ces revues occupent la toute première place dans la liste historique des publications françaises en physique, très loin devant celles par exemple de l'éditeur commercial Elsevier. La relation avec l'APS s'inscrit dans un partenariat entre sociétés savantes, et nombreux sont les physiciens français adhérant à l'APS. D'un point de vue plus commercial, les physiciens en France sont non seulement grands consommateurs mais aussi grands fournisseurs d'articles publiés par l'APS.

En 2014, la SFP s'était déjà exprimée sur le rapport cout/bénéfice des abonnements aux revues de l'APS [1]. Pour une facture nationale estimée aujourd'hui à environ 2 M€ par an, toute la communauté abonnée en France accède massivement aux 20 000 articles publiés par l'APS chaque année, ainsi qu'à ses archives complètes depuis un siècle. Côté fournisseur, pas moins de 11 % de tous les articles publiés par l'APS ont une affiliation française. Compte tenu de cet usage intense, et pour une discipline motrice de notre économie [2], la somme de 2 M€ ne nous semble pas excessive.

L'accord entre les nombreux abonnés français et l'APS sera renégocié très bientôt. La menace de ne pas accepter les abonnements APS en 2022 du fait de leur prix élevé, qui semble circuler au sein des négociateurs en France, inquiète beaucoup la SFP et la SFO. Il est donc essentiel qu'une discussion s'engage entre ceux qui sont concernés par les revues de l'APS, notamment les organismes scientifiques et les universités. Une fermeture de l'accès à ces revues aurait un impact dévastateur dans la communauté française de physique.

Bien entendu, les nouvelles négociations insisteront beaucoup plus sur la science ouverte, sur la transparence et sur la biblio-diversité. En France, la science ouverte s'appuie surtout sur la voie « verte », c'est-à-dire le dépôt obligatoire dans les archives ouvertes et/ou institutionnelles. Inutile de rappeler que les physiciens, en France, en Europe et aux États-Unis, sont pionniers. Depuis longtemps, ils ont déposé leurs manuscrits dans ArXiv, INSPIRE ou (en France) HAL.

La plateforme des revues APS s'est déjà adaptée considérablement aux mouvements récents de la science ouverte. Les revues « hybrides », telles que *Physical Review Letters*, *Physical Review C* et *D*, sont entrées dans le consortium d'accès libre « Gold » SCOAP3 piloté par le CERN ; puis *Physical Review X* et *Physical Review Research* ont été lancées entièrement en accès libre *Gold*. Certes, la voie « dorée » n'est pas celle choisie par la France, mais elle est digne d'exister et encouragée par le Plan S en Europe. Quant à la biblio-diversité, notons que l'APS est parmi les maisons d'édition « vertueuses », autorisant même l'auto-archivage de la version de l'éditeur sous certaines conditions ; et son fonctionnement est quasiment compatible avec le Plan national pour la science ouverte. La SFP et la SFO tiennent donc à insister sur le service de grande qualité de l'APS, qui est indispensable à notre communauté. Bien sûr, le « juste » prix reste à définir et nous ferons confiance au bon sens des négociateurs pour y arriver.

Reste la question de la transparence. Aujourd'hui, le partenariat commercial entre l'APS et la France consiste en un groupement de commandes de presque soixante établissements et organismes, une lourde comptabilité gérée en partie par le consortium Couperin. Il est temps de le rénover en profondeur. Nous proposons aux nombreux partenaires français de se rassembler autour d'un projet partagé. Plusieurs options existent, par exemple une licence nationale, comme celle négociée récemment avec Elsevier, ou la formule de *Publish & Read*, conclue entre l'APS et le Max Planck Gesellschaft. Un accord national renforcerait l'impact interdisciplinaire et industriel de la physique, il augmenterait le poids de la France dans la négociation. Enfin, l'existence d'un guichet unique fournirait la transparence au niveau national.

Le rassemblement des universités et grandes écoles, du CNRS et du CEA, autour d'un projet commun avec l'APS, porté par Couperin, est une opportunité qu'il ne faudra pas manquer.

[1] « Reconduction des abonnements aux revues de l'APS », *Reflète de la Physique*, 38 (2014) 42.

[2] "The importance of physics to the economies of Europe", CEBR analysis commissioned by the European Physical Society (2019).



© C. Argoud, ESRF

Prix **Friedel-Volterra 2018** (conjoint SIF-SFP) : **Francesco Sette**

Francesco Sette est né en 1957. Après avoir obtenu son doctorat en physique à l'université La Sapienza de Rome, il effectue un stage postdoctoral à la source synchrotron NSLS du Brookhaven National Laboratory aux USA, puis il travaille de 1984 à 1990 aux AT&T Bell Laboratories à Murray Hill (New Jersey, USA). Il est recruté par l'European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) en 1991. Il en devient directeur de la recherche en 2001, puis directeur général en 2009.

Francesco Sette a effectué des recherches majeures avec le rayonnement synchrotron. Aux USA, avec C.T. Chen, il a mis au point la première source de rayons X mous de haute intensité et haute résolution en énergie (la ligne "Dragon"), qui a été reproduite dans de nombreux centres synchrotron dans le monde. Ceci a été une puissante percée instrumentale pour résoudre des problèmes en nanosciences : par exemple, mesurer les propriétés de matériaux bidimensionnels, ou la grandeur et l'orientation des moments magnétiques orbitaux et de *spin* de monocouches magnétiques, ou encore déterminer l'orientation de molécules adsorbées sur les surfaces. Ces résultats font partie des grands succès scientifiques obtenus par les sources de rayonnement X synchrotron.

À l'ESRF, Francesco Sette a d'abord été responsable d'un groupe qui a développé une nouvelle génération de lignes de diffusion inélastique de rayons X, qui ont permis d'étudier les mouvements atomiques et les propriétés électroniques de la matière condensée dans des régions inexplorées de l'espace des phases.

Comme directeur scientifique puis directeur général de l'ESRF, F. Sette a joué un rôle pivot dans la conception et la réalisation de la première phase du programme d'amélioration (2009-2015). Il dirige actuellement le projet EBS (Extremely Brilliant Source) qui vise à transformer l'ESRF en une source de 4^e génération, avec la brillance la plus élevée dans le monde. Le projet EBS comprend une innovation majeure dans la structure magnétique de l'anneau de stockage, qui permettra de réduire considérablement l'émission horizontale du faisceau d'électrons, conduisant à un accroissement de plus de deux ordres de grandeur de la brillance de la source de photons, ainsi qu'à un accroissement correspondant de la cohérence transverse du faisceau émis (voir *Reflets de la physique* **34-35** (2013) 14-15).

Francesco Sette est ou a été membre des comités scientifiques des principales sources de lumière dans le monde. Les Sociétés Italienne et Française de Physique (SIF et SFP) sont très honorées de lui remettre le prix Friedel-Volterra 2018.



Prix **Holweck 2019** (conjoint IoP-SFP) : **Xavier Garbet**

Xavier Garbet a 59 ans. Ancien élève de l'ENS Paris, il soutient sa thèse en 1988 à l'Université d'Aix-Marseille sur le sujet de la turbulence magnétique et du transport anormal dans les plasmas de tokamaks. Recruté par le CEA la même année, il effectue de 2001 à 2004 un séjour au Joint European Torus (JET) au Royaume-Uni. Il est actuellement directeur de recherche à l'Institut de recherche sur la fusion magnétique (IRFM) du CEA Cadarache.

Xavier Garbet est un expert mondialement reconnu de la théorie des plasmas de tokamaks. Avec quelques collègues étrangers, il a posé les fondations de la théorie « gyrocinétique », établissant des connexions avec la physique non linéaire, la physique statistique, l'astrophysique et la physique des plasmas spatiaux. Il a identifié très tôt le rôle pivot des codes numériques performants pour la recherche scientifique.

Son expertise couvre un large domaine de phénomènes dans les plasmas chauds magnétisés, allant de la microturbulence à la magnéto-hydrodynamique à large échelle et aux processus de collision. Il a effectué des travaux pionniers sur de nouveaux types d'instabilités des plasmas et de mécanismes de transport, qui sont maintenant reconnus comme critiques dans les plasmas de fusion. Il a dérivé la formulation générale du taux de production d'entropie dans la turbulence des plasmas de tokamaks, fournissant ainsi un moyen rigoureux pour définir les forces et flux thermodynamiques. Dans le contexte du transport des impuretés, pour lequel l'intérêt a

été renouvelé avec la paroi en tungstène d'ITER, il a réexaminé la théorie néoclassique du transport dans la description gyrocinétique.

Il contribue activement à l'ouverture de la physique des plasmas en direction des autres domaines de la physique. Avec quelques collègues, il a fondé le « Festival de théorie », qui réunit tous les deux ans pendant trois ou quatre semaines à Aix-en-Provence les physiciens et mathématiciens intéressés par la dynamique non linéaire des plasmas aimantés et la dynamique des fluides. Ce festival a acquis une renommée internationale (voir *Reflets de la physique* **56** (2018) 40). Xavier Garbet a une position de leader dans le domaine de la turbulence des plasmas, reconnue par des articles de revue et des conférences et collaborations internationales. Lauréat de la médaille d'argent du CNRS en 2010, il a publié plus de 600 articles et est membre de plus de vingt conseils scientifiques dans le monde.

L'Institute of Physics britannique et la Société Française de Physique sont très heureuses de lui décerner le prix Holweck 2019.



Hommage à Robert Klapisch (1932-2020)

C'est avec une profonde tristesse que nous avons appris le décès de Robert Klapisch, le 21 mars 2020. C'est un pionnier de la physique nucléaire et hadronique européenne qui disparaît et laisse sa communauté en deuil.

Robert Klapisch fut un remarquable représentant de ces chercheurs nés peu avant la Seconde Guerre mondiale et marqués par elle, mais ayant bénéficié du redémarrage permis par la renaissance du CNRS et facilité par les « Trente Glorieuses ». Une génération où se conjuguèrent solidarités et ambitions, idéologies et sens aigu des rapports entre science et société. Sa famille, juive, a connu la traque et la déportation, mais lui a pu reprendre une scolarité brillante et intégrer l'École de Physique et Chimie de Paris. À peine sorti, il est recruté par le CNRS en 1956.

À l'Institut de physique nucléaire (IPN) d'Orsay, il est formé à la séparation électromagnétique d'isotopes par René Bernas, qui influera profondément son développement scientifique et personnel. Il le suit lorsque ce dernier crée un laboratoire centré sur l'utilisation des faisceaux d'ions dans différentes disciplines, dont la physique et l'astrophysique nucléaires : le Centre de spectrométrie nucléaire et de spectrométrie de masse (CSNSM), sur le campus de la faculté d'Orsay en 1962.

L'équipe Klapisch apporte alors une contribution majeure à la résolution de l'énigme de la faible abondance de lithium, béryllium et bore dans l'Univers. Puis des spectromètres de masse « en ligne » sur faisceaux d'accélérateurs permettront d'enchaîner les exploits scientifiques. Pionnière des expériences ISOLDE au CERN, l'équipe étudie des noyaux exotiques, inconnus et fugaces, à l'extrême limite de la stabilité, avec plus du double de neutrons que de protons.

Entre 1981 et 1987, Robert Klapisch devient directeur de la recherche au CERN. C'est l'époque de la découverte des bosons W et Z et du prix Nobel de physique pour Carlo Rubbia et Simon van der Meer (1984). Robert Klapisch encourage alors deux recherches hors des traditions du CERN : l'antimatière avec l'anneau d'antiprotons LEAR, et les ions lourds relativistes, explorant le plasma de quarks et de gluons. Entre 1988 et 1993, il renouvelle la communication du CERN et initie la publication des *Images de la physique* au CNRS.

Robert Klapisch a toujours lié science et responsabilité sociale. Membre du mouvement Pugwash pour éviter la guerre nucléaire, de la commission préparant la Charte de l'environnement et de l'Association française pour l'avancement des sciences (AFAS), il initie en 2002 les conférences « Partager le savoir » pour favoriser le dialogue entre scientifiques autour de la Méditerranée, y compris Israéliens et Palestiniens, sur des sujets vitaux : fracture numérique, besoins de base (eau, énergie, nourriture), formation et recherche. Il crée en 2006, avec le soutien d'institutions et d'industriels européens, la Fondation « Partager le savoir », qui poursuit ces échanges fructueux entre les scientifiques d'Afrique du Nord, d'Afrique subsaharienne, et leurs collègues européens. Il s'y est consacré jusqu'à sa disparition avec le même enthousiasme amical, la fraternité et l'énergie têtue qu'il déployait pour aboutir à des résultats concrets.

Le souvenir d'un remarquable chercheur et d'un humaniste, restera à jamais dans nos mémoires.

Témoignage

Arrivant de mon Algérie natale, je t'ai rencontré, Robert Klapisch, au CERN à l'automne 1988. Je démarrais une thèse et tu étais présent pratiquement tous les jours. Tu faisais ta tournée auprès des expériences, un mot par ci et par là, un café partagé, une discussion sur les techniques, la sécurité... un mot gentil. « Facilitateur ». Voilà ce qu'il était, Robert. Puis, je l'ai connu de tous les combats pour la science, le progrès technologique, le savoir auprès de tous, mais en particulier auprès des pays en voie de développement. Lors d'une rencontre AFAS à Marseille, il m'avait invité pour témoigner de la condition des femmes scientifiques au Maghreb.

Son rêve était tout d'abord de partager les savoirs en Méditerranée. Mais la Méditerranée est plus qu'une terre de partage, c'est une terre de passage. Alors, partager entre Europe, Afrique et Moyen-Orient s'imposait. Faire discuter des scientifiques israéliens et palestiniens autour des techniques de dessalement de l'eau, c'était d'abord les faire discuter entre eux. Il n'était pas naïf, il avait juste un peu plus d'espoir que nous tous présents. Mais plus encore, il a œuvré pour que le Maroc, premier pays africain à participer aux expériences du CERN, le reste en se faisant l'interlocuteur, le « facilitateur » entre le gouvernement marocain et le CERN.

Fairouz Malek

Laboratoire de Physique Subatomique et Cosmologie (CNRS), Grenoble



L'Apprentissage de la critique

Développer l'analyse critique en physique

Laurence Viennot et Nicolas Décamp

(EDP Sciences et UGA Éditions, 2019, 200 p., 25 € (version papier), 16,99 € (version numérique))

Sous un titre d'une extrême sobriété, Laurence Viennot et Nicolas Décamp proposent un texte dense et riche d'enseignements. C'est dans leur triple appartenance, dans leur triple expertise de physiciens, enseignants et chercheurs en didactique, qu'il faut trouver la source et l'originalité de leur ouvrage qui s'appuie sur une expérimentation en milieux lycéen, étudiant, et auprès de jeunes professeurs. Et cela autour d'un thème dont nul ne saurait négliger l'importance et l'actualité par ces temps de *désinfox*, le développement de l'esprit critique.

Science exacte et aboutie, la physique peut apparaître comme un domaine de choix, sans risques ni pièges, pour s'exercer à l'analyse critique. À partir d'études de documents destinés pour l'essentiel à l'enseignement, les auteurs vont nous montrer, avec parfois quelque malice, que ce n'est pas si simple.

Que penser par exemple de ces trop nombreux cas d'approximations hasardeuses, de contradictions internes, contre-vérités même, relevées dans des manuels largement diffusés et validés par leurs auteurs, leurs éditeurs, et les enseignants qui les utilisent ? L'un des plus réjouissants, ou navrants, est un calcul largement répandu de la condition d'ascension d'une montgolfière utilisant la poussée d'Archimède, après avoir postulé explicitement une condition d'atmosphère isobare ! Si le pauvre élève n'y comprend rien, il a bien raison, mais qui le lui dira ? Et que ne trouve-t-on pas dans les traitements de la pression osmotique ou de la capillarité ?

Bien entendu, les auteurs ne se limitent pas à construire un catalogue de sottises manifestes, ils se livrent à un travail d'analyse et de synthèse, en essayant de les classer et même de comprendre les ressorts psychocognitifs qui en sont la source. Ainsi, le souci de

simplification qui fera ignorer une variable sur deux dans une histoire de gaz, le gout du récit linéaire qui suggère une temporalité illusoire, ou l'usage abusif de l'analogie et de la métaphore. Et surtout ils expérimentent en situation réelle, testant différents documents auprès des publics auxquels ils sont dédiés pour en apprécier les capacités de critique. Quand et comment parviennent-ils à déceler la faille ? Citons par exemple, avec un groupe de futurs enseignants, un passionnant débat autour du principe de la datation au carbone 14.

Conservant malgré tout un certain optimisme, les auteurs concluent : « Au-delà des connaissances que chacun accumule... l'analyse critique est une composante essentielle de la pensée. L'exercer modestement mais librement constitue un magnifique objectif de formation... ». En tout cas, on peut assurer que le physicien et l'enseignant, au sortir de ce livre, où se côtoient physique, didactique, épistémologie et psychologie comportementale, se sentira un peu différent.

Madeleine Veysié

Physicienne au Collège de France

La prodigieuse histoire du nom des éléments

Pierre Avenas, avec la collaboration de Minh-Thu Dinh-Audouin

Prix spécial 2019 de l'Académie nationale des sciences, belles-lettres et arts de Bordeaux

Quel est le rapport entre l'ADN, la noix et Jupiter, entre l'hémoglobine, Mars et *Iron Man*, le nickel et les sept nains, ou encore entre les chats, la menthe, la térébenthine, Éric-Emmanuel Schmitt, le polystyrène et Raymond Queneau ?

Cet ouvrage raconte les histoires des noms d'éléments dans tous les sens du terme : qu'ils soient des éléments de la nature (la terre, l'eau, plantes et animaux...), des éléments constitutifs du vivant (l'ADN, les protéines, les oligo-éléments...) et des matériaux (métaux, polymères...), ou encore des éléments du tableau périodique de Mendeleïev, entièrement parcouru au fil des chapitres.

Le lecteur découvre que les noms des éléments sont souvent révélateurs des inspirations et des rêves d'hommes et de femmes.

L'histoire prodigieuse de ces noms l'emmène vers des mondes insoupçonnés : la nature, l'astronomie, l'histoire, la littérature, les voyages, et même les légendes et la mythologie.



EDP Sciences – 2019
272 pages
19 € (livre papier),
12,99 € (e-book, pdf)

La recherche, un droit mondial

Michèle Leduc⁽¹⁾ (leduc@lkb.ens.fr), François Piuzzi⁽²⁾, Michel Spiro⁽³⁾ et Annick Suzor-Weiner⁽⁴⁾

(1) Directrice de recherche émérite au CNRS, membre du COMETS (Comité d'éthique du CNRS)

(2) Ancien ingénieur du CEA, président de la commission Physique sans frontières de la SFP

(3) Ancien président du conseil du Cern, président de l'IUPAP (International Union for Pure and Applied Physics)

(4) Professeure émérite de l'université Paris-Saclay, chargée de mission auprès de l'AUF (Agence universitaire de la francophonie)

La crise sanitaire nous fait prendre conscience de la mondialisation des problèmes sociétaux, qui touchent nos populations et encore plus celles des États où dominent la pauvreté et bien souvent la corruption. La crise suscite de forts élans de solidarité, auxquels les scientifiques sont naturellement associés, avec la responsabilité d'apporter leur expertise, nécessaire à la compréhension des phénomènes en cours.



1. Logo du programme PAUSE.

Dans un contexte géopolitique de plus en plus tendu, il nous semble que cet élan de solidarité doit nous conduire à adopter une démarche éthique active, particulièrement nécessaire envers nos collègues scientifiques qui exercent leur métier dans des conditions difficiles et parfois dangereuses. C'est le cas dans les pays en guerre ou soumis à une dictature politique, ou même dans des États supposés démocratiques mais où règne l'arbitraire pour des raisons idéologiques. Les scientifiques qui prennent la parole, développant et enseignant l'esprit critique, y sont particulièrement ciblés. Lorsque les chapes de plomb s'installent sur les libertés, ils sont parmi les premiers visés par les purges, persécutés, privés de liberté, et parfois même exécutés. Nous nous interrogeons sur l'opportunité pour la Société Française de Physique (SFP) de se pencher sur les manquements aux Droits Humains et sur la défense des scientifiques, dans son domaine de la physique et plus généralement dans le monde universitaire et de la recherche, sans frontières disciplinaires trop strictes.

Quelques exemples récents illustrent notre propos. En Iran, des scientifiques sont emprisonnés sous de fausses accusations d'espionnage ou de complicité avec les opposants au régime des mollahs. Nargès Mohammadi, physicienne de formation, vice-présidente de *Defenders of Human Rights*, centre dirigé par la lauréate du prix Nobel de la paix Shirin Ebadi, est condamnée à Téhéran à seize ans de prison pour crimes politiques, et sa santé est en grave danger. Fariba Abdelkha, directrice de recherche franco-iranienne travaillant en Iran, est incarcérée depuis juin 2019 ; après une dure grève de la faim, elle vient d'être condamnée à cinq ans de prison pour collusion avec l'opposition au régime. En Turquie, règne au plus haut point la censure à l'égard des intellectuels. Le régime s'attaque non seulement aux journalistes mais maintenant aux professeurs d'université, déchus de leur poste, sans salaires ni moyens d'existence [1]. De vives inquiétudes se font jour aussi pour nos collègues chercheurs du Brésil, soumis à une nouvelle hiérarchie des

sciences selon leur supposée profitabilité, alors même que se met en place un climat menaçant sur les campus. La situation est à peine meilleure aux États-Unis pour certains secteurs de recherche, comme les sciences du climat qui se voient pratiquement privées de tout moyen, sans autorisation d'archivage de leurs données.

Que peut faire la Société Française de Physique dans ce rude contexte international ? Elle peut, avec sa communauté et avec sa commission Physique sans frontières, contribuer, avec d'autres sociétés savantes et d'autres organisations, à maintenir la pression pour faire relâcher les contraintes pesant sur nos collègues en difficulté à l'étranger. Rappelons que la SFP a créé en 1990 une *Commission des Droits de l'Homme et Questions éthiques* (CDH), longtemps animée par Lydie Koch-Miramond du CEA [2]. À la suggestion de sa commission CDH, la SFP intervenait plusieurs fois par an en s'adressant aux dirigeants politiques là où des collègues se trouvaient en grave difficulté (une douzaine de fois en 2007-2008 dans des pays comme l'Égypte, le Tchad, etc.). Elle avait inscrit dans son code de déontologie : « *Quand un membre de notre communauté est persécuté, c'est notre communauté tout entière qui est persécutée.* » Elle travaillait en liaison avec des organisations non gouvernementales de défense des Droits Humains, et l'association européenne Euroscience relayait certaines de ces activités concernant des scientifiques européens. Depuis près de dix ans la CDH a cessé de fonctionner à la SFP, alors même que des comités de même nature dans le domaine de la physique sont très actifs dans d'autres pays. On peut citer qu'aux États-Unis l'APS (*American Physical Society*) anime le *Committee on International Freedom of Scientists* et un nouveau réseau APS-IDEA (*APS-Inclusion, Diversity and Equity Alliance*) qui coordonne les initiatives des départements et laboratoires de physique. L'EPS (*European Physical Society*) n'a pas créé de structure équivalente, mais traite les problèmes des Droits Humains à travers sa commission *Physics and Society*.

Depuis trois ans en France, le MESRI (*Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation*) a créé un programme de défense des chercheurs en danger, le programme PAUSE (*Programme national d'Accueil en Urgence des Scientifiques en Exil*), aux enjeux humanitaires et de défense de la recherche [1, 3] (fig. 1). Géré par le Collège de France et doté de moyens significatifs, **il accorde des financements incitatifs aux établissements d'enseignement supérieur et aux organismes de recherche publics projetant d'accueillir des scientifiques en situation d'urgence, et les accompagne dans leurs démarches.** Ce programme a déjà permis l'accueil de plus de 200 chercheurs, dont près de la moitié sont des femmes. Certains sont aidés sur deux ans, voire trois pour les doctorants. PAUSE lance régulièrement des appels à candidature et fonctionne très bien dans les domaines des sciences humaines et sociales (60%) ; il pourrait être mieux connu dans nos laboratoires de physique – et la SFP pourrait y aider.

En résumé, même si la SFP n'a pas été inactive sur ces sujets, nous estimons qu'en tant qu'association ayant pour objet la promotion de la physique et d'une manière plus générale de la recherche, elle pourrait se préoccuper encore plus de la violation des droits des personnes exerçant cette même activité hors de notre territoire : en effet, la recherche est **un droit mondial** [4]. Nous posons ici la question de l'opportunité pour la SFP de faire appel à quelques volontaires motivés pour suivre ces questions en son nom, éventuellement avec d'autres sociétés savantes. Pour l'instant, sans suggérer de cadre précis, nous souhaitons simplement à travers cette tribune provoquer une réflexion parmi les adhérents de la SFP sur la défense des Droits Humains que nous jugeons nécessaire. ■

Références

- 1• É. Brézin, « Les universitaires turcs en procès », *Reflets de la physique* 57 (2018) 47.
- 2• L. Koch-Miramond, « La Commission des Droits de l'Homme et Questions éthiques de la SFP », *Reflets de la physique* 10 (2008) 4.
- 3• www.college-de-france.fr/site/programme-pause/index.htm
- 4• Voir l'avis du COMETS n° 2018-38, « La recherche : un droit mondial », où le COMETS (Comité d'éthique du CNRS) s'interroge sur le droit pour les chercheurs du monde entier d'exercer une activité de recherche en tout lieu, sans tabou, sans entrave et sans pression.

Glace de spin : l'expérience

Une bande dessinée de 16 pages, conçue par Isabelle Mirebeau, physicienne au Laboratoire Léon Brillouin (LLB, CEA-CNRS), et Claudia Decorse, chimiste à l'Institut de chimie moléculaire et des matériaux d'Orsay (ICMMO), et réalisée par Aurélie Bordenave, illustratrice scientifique.



En quoi consiste le travail d'un chercheur ?
Qu'est-ce qu'une expérience de recherche ?
Comment est-elle vécue au jour le jour ?

Ces questions interpellent les étudiants, et aussi un certain public intéressé par la science « en train de se faire ».

Dans cette BD, un étudiant en Master découvre le monde de la recherche. Il aborde un sujet très pointu, les glaces de spin, des composés magnétiques doués d'une propriété mystérieuse, l'entropie, qui leur offre une multitude d'états possibles, comme les protons dans la glace.

Il fait pousser des cristaux, les étudie avec des rayons X, puis utilise les neutrons d'un réacteur nucléaire pour sonder ce magnétisme exotique. Il pose des questions, prend des initiatives, va de surprises en déceptions, et se laisse gagner par le virus du découvreur.

Le fichier pdf de la BD peut être téléchargé sur : <https://cutt.ly/cea-glacedespin>

Une version papier de l'album peut être obtenue sur demande au LLB : soit auprès d'Alain Menelle (alain.menelle@cea.fr), soit par téléphone au secrétariat (01 69 08 52 41).

#NuitdesTemps

10 mars 2021

La Nuit des Temps



ANNECY
BELFORT
BESANCON
BORDEAUX
BOURGES
CAEN
CLERMONT-FERRAND
DIJON
DUNKERQUE
EVREUX
GENEVE
GRENOBLE
LE HAVRE
LILLE
LIMOGES
LYON
MARSEILLE*
MONTPELLIER*
MULHOUSE
NANCY
NICE
ORLEANS
PARIS
REIMS*
ROUEN
SAINT-ETIENNE
STRASBOURG
TOULOUSE
VILLETANEUSE

*villes à confirmer

Des concours ouverts à tous

Concours expérimentaux, littéraires, artistiques et philosophiques
ouverts aux élèves de primaire jusqu'aux classes préparatoires.
Date limite pour s'inscrire : 20 décembre 2020.

Une soirée festive

Le 10 mars 2021, au Grand Rex à Paris et dans de nombreuses autres
villes de France. Au programme : conférences, visites virtuelles de sites
ou laboratoires emblématiques, tables rondes et jeux quizz !
Entrée gratuite - sur inscription