

de la **PHYSIQUE** *reflets*

n°11
octobre 2008

Revue de la Société Française de Physique

Appel
des cotisations
2009

- ▶ **Physique nucléaire**
La radioactivité deux-protons
Frédéric Joliot-Curie et la première pile atomique française
- ▶ **Instabilités de flambage dans les fluides visqueux**
Le méthane dans l'atmosphère de Titan
- ▶ **Un festival d'art et physique**



Grandes écoles et universités : un système de formation à harmoniser



La coexistence des grandes écoles et des universités crée en France une divergence de culture et un cloisonnement de carrière pour les cadres scientifiques, qui handicapent la nécessaire fluidité entre les métiers de la science. Les écoles d'ingénieurs et leurs classes préparatoires (CPGE) se sont multipliées depuis vingt ans et les meilleurs bacheliers choisissent massivement l'orientation vers les filières sélectives. En licence de physique, le nombre des étudiants est en baisse presque partout et leur disparité de niveau par rapport aux élèves de CPGE est flagrante. De plus, les formations longues du système universitaire ont des débouchés limités car les entreprises préfèrent généralement embaucher les ingénieurs sortis d'écoles plutôt que des docteurs d'université.

La première urgence nous semble être d'augmenter le flux de bons étudiants à l'université. La qualité de la formation fournie en licence est d'importance primordiale. L'encadrement des étudiants est certainement à améliorer, avec un contrôle continu décourageant l'amateurisme et des objectifs précis en termes d'acquisition des connaissances et de savoir-faire, corrigeant l'émiettement résultant du LMD. Une bien meilleure information comparative en terminale sur les cursus universitaires et les débouchés des différentes filières augmenterait la visibilité du champ des métiers possibles.

L'amélioration de la vie sur les campus est un autre élément pour y attirer plus de jeunes, avec un service d'accueil chaleureux, une vie culturelle sur place, des lieux de rencontre, des locaux ouverts tard le soir, et évidemment des logements décentes en nombre suffisant – ce qui implique, il est vrai, des moyens dont manquent cruellement les établissements, en dépit de la future manne du plan Campus, fortement médiatisée mais finalement assez modeste. Tout ceci serait d'ailleurs de nature à augmenter

l'attrait de nos universités vis-à-vis des étudiants étrangers, pour lesquels on devrait aussi penser à des cours intensifs de langue française, des « jobs » étudiants et des enseignements en anglais au niveau du master et du doctorat.

De plus, nous pensons souhaitable que s'instaure une vraie réflexion sur la sélection à l'entrée des universités. Il nous paraît évident qu'on ne peut pas vouloir développer des universités d'élite pour la recherche et continuer à y accueillir tous les bacheliers sans tri. Afin de développer dans les universités une saine émulation avec les CPGE, pourquoi ne pas permettre aux universités de mettre en place dans leurs domaines d'excellence des programmes ambitieux dont le recrutement serait inévitablement sélectif ? Avec des chercheurs de haut niveau comme enseignants, les étudiants fortement motivés formeraient ainsi un vivier de jeunes scientifiques de premier plan, aussi bien pour la recherche que pour la R et D de niveau supérieur dans les entreprises.

Enfin, nous pensons qu'on peut faire progressivement évoluer le système pour favoriser le rapprochement entre les CPGE et les universités. Il est en effet dommage que le succès des CPGE prive leurs élèves du contact avec la recherche. Une osmose entre les formations devrait être établie, sous forme d'accueil des étudiants de CPGE au sein des laboratoires de recherche dans les universités, par exemple pour des stages et tout particulièrement pour la préparation de leurs travaux d'initiative personnelle encadrés (les TIPE). Les professeurs de CPGE et ceux des universités se verraient offrir des possibilités de croiser leurs services d'enseignement et des détachements seraient facilités. Un tel rapprochement serait l'occasion de rénover les programmes des CPGE en physique et chimie, très encyclopédiques et trop tendus, au profit d'un approfondissement disciplinaire et d'une participation plus personnelle des élèves.

En résumé, nous avançons ici quelques suggestions pour rapprocher les formations et limiter la monoculture de nos cadres scientifiques, issus presque exclusivement des grandes écoles, afin que les jeunes étudiants puissent choisir leur orientation et trouver les conditions correspondant au mieux à leur motivation.

Michèle Leduc
et Roger Maynard

Éditorial

- 2 Grandes écoles et universités : un système de formation à harmoniser
M. Leduc et R. Maynard

Le mot de la rédaction

- 4 Bilan des réponses au questionnaire sur *Reflets de la physique*
C.H. de Novion et S. Magnier

Avancées de la recherche

- 5 La radioactivité deux-protons : un nouveau mode de désintégration des noyaux
B. Blank et G. Canchel
- 9 Instabilités de flambage dans les fluides visqueux : de la laboratoire au manteau terrestre
N. M. Ribe, M. Habibi, D. Bonn et É. Stutzmann
- 13 Le méthane dans l'atmosphère de Titan : de la spectroscopie fondamentale à la planétologie
V. Boudon, J.-P. Champion, T. Gabard, M. Loïte, A. Coustenis, C. de Bergh, B. Bézard, E. Lellouch, P. Drossart, M. Hirtzig, A. Negrão et C. A. Griffith

Science et société

- 17 Frédéric Joliot-Curie et la première pile atomique française
P. Radvanyi
- 20 Le festival *Arphystic*
D. Hennequin

Au sein et autour de la SFP

- 23 Vie de la SFP
- 24 Prix scientifiques
- 26 Les *De Gennes Days* : un hommage rendu à Pierre-Gilles de Gennes
L. Auvray, É. Guyon, J.-F. Joanny, L. Léger et G. Rubinstenn

Reflets de la physique et ses lecteurs

- 28 Courrier des lecteurs
- 29 Appel des cotisations SFP et abonnements pour 2009
- 30 Notes de lecture
- 32 Le musée Curie, lieu de mémoire et d'histoire

Comité de rédaction

Président : Jean-Pierre HULIN

Membres : Patricia BASSEREAU - Michel BELAKHOVSKY - Jacques CHOMILIER? - Anne DAVAILLE? - David GUÉRY-ODELIN - Étienne GUYON - Pascale HENNEQUIN - Georges LANDA - Roland LEHOUCQ - Jérôme MARGUERON - Charles de NOVION - Sophie REMY - Claude SÉBENNE - José TEIXEIRA - Jean VANNIMENUS - Christophe YÉCHE

Directeur de la publication : Sylvie MAGNIER

Rédacteur en chef : Charles de NOVION

Conception : Lætitia MORIN - Keith VILLEMEUR

Réalisation graphique : Lætitia MORIN

Suivi de rédaction : Agathe CYMER

dépôt légal 4^e trimestre 2008 - Commission Paritaire 0310 G 86176 - ISSN 1953-793 X

© SFP - Édité à 4000 exemplaires

IMP Graphic - 14, rue La Fayette - 58204 Cosne-sur-Loire - Tél. : 03 86 39259259

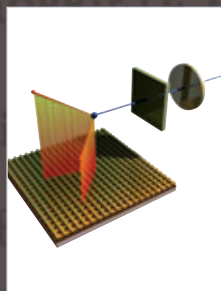
Société française de physique, 33, rue Croulebarbe, 75013 Paris

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

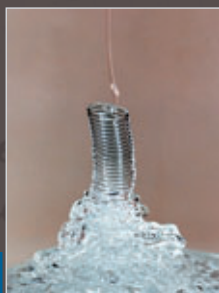
e-mail : sfp@sfpnet.org - Serveur : www.sfpnet.fr

SFP?Bulletin, Institut Henri-Poincaré, 11, rue Pierre-et-Marie Curie, 75005 Paris

e-mail : sfp-bulletin@ihp.jussieu.fr

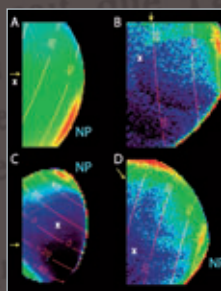


page 7

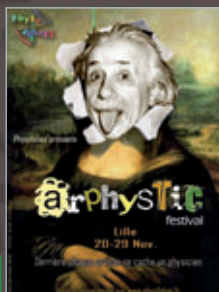


page 9

© Yefre Frankel, MIT



page 15



page 20



En couverture : Joliot, Halban et Kowarski au laboratoire de chimie nucléaire du Collège de France. Voir article p. 17.

Bilan des réponses au questionnaire sur *Reflets de la physique*

Les réponses au « Questionnaire sur *Reflets de la physique* » (paru dans le n°8, p. 4) ont été suffisamment nombreuses (une quarantaine), précises et (en général) argumentées pour nous faire une idée claire de votre opinion et de vos souhaits.

La présentation actuelle de *Reflets*, le poids relatif des quatre rubriques, ont fait l'objet d'une satisfaction (presque) unanime. Vous verrez, néanmoins, que nous avons procédé dans ce numéro à quelques améliorations, en particulier dans la présentation des légendes de figures.

Le niveau scientifique des articles d'« Avancées de la recherche » a été jugé satisfaisant (à trois réponses près, deux le jugeant trop élevé, une le jugeant pas assez élevé). Trouver le niveau adapté à la majorité de nos lecteurs est en effet une voie étroite, entre une vulgarisation trop superficielle, et des articles de grande qualité mais abordables par les seuls spécialistes du domaine. Il faut ici remercier les membres du comité de rédaction, pour leur travail de relecture et de discussion avec les auteurs.

La physique théorique est un sous-ensemble très actif de la discipline, qui ne doit pas être contourné. Nous avons donc prévu, dans les prochains numéros, de publier quelques articles théoriques, en particulier sur la théorie des cordes. Il sera très important et intéressant de voir le retour de nos lecteurs.

Le dossier photovoltaïque a été unanimement apprécié, et le renouvellement de la formule souhaité. Ceci ne peut évidemment pas se faire pour tous les numéros. Il est raisonnable de prévoir un dossier par an. À court terme, nous publierons un dossier sur l'électronique de *spin*, dans le sillage du prix Nobel attribué à Albert Fert. Puis viendra un dossier sur la fusion contrôlée et ITER. De nombreux sujets ont été proposés par nos lecteurs, en particulier sur l'énergie (piles à combustible, stockage de l'énergie...) et sur « physique et santé » (imagerie médicale, accélérateurs de particules et médecine...).

En ce qui concerne la proportion de débats, interviews, portraits, reportages dans les laboratoires, les avis sont au contraire partagés. Cependant, ce type de rubrique est très important, surtout pour les jeunes, car il permet de mieux connaître notre milieu.

Une intervention renforcée des divisions de spécialité et des sections régionales n'a pas fait l'unanimité. En majorité, les réponses proposent plutôt des « flashes » sur des initiatives intéressantes ou sur des projets phares.

Enfin, pour valoriser la notoriété et le contenu de la revue, nos lecteurs pensent que *Reflets de la physique* doit en priorité développer son audience vers les enseignants de physique (du secondaire et du supérieur) qui forment les physiciens de demain. Mais, la proposition qui revient le plus souvent est celle de la mise de la revue sur site *internet*. C'est le nouvel objectif auquel va s'attaquer la rédaction de *Reflets*, et dont nous parlerons dans le prochain numéro (voir aussi le compte rendu du Conseil d'administration du 20 juin, p. 23).

Charles de Novion
Rédacteur en chef

Sylvie Magnier
Directrice de la publication

GRAND JOUR POUR LA PHYSIQUE : Démarrage du LHC au CERN



Le 10 septembre 2008, pour la première fois, des faisceaux de protons ont été injectés avec succès dans le collisionneur de hadrons (LHC) du CERN à Genève. Ils ont pu parcourir un tour complet dans les deux anneaux de 27 kilomètres qui constituent l'accélérateur de particules le plus puissant au monde. Il s'agit d'un jour historique pour toute la communauté des physiciens des particules qui travaillent sur ce projet depuis plus de vingt ans.

Les quatre expériences réalisées auprès du LHC essayeront de répondre à des questions fondamentales de la physique. Atlas et CMS rechercheront le boson de Higgs, à l'origine de la masse des particules, et de nouvelles particules qui pourraient former la Matière Noire de l'Univers. LHCb tentera d'expliquer pourquoi la Nature préfère la matière à l'antimatière. Enfin, Alice sondera la matière telle qu'elle se présentait aux débuts de l'Univers.

Cependant, ce n'est que le commencement d'une grande aventure, car il reste encore à obtenir les premières collisions et à étalonner les quatre expériences. *Reflets de la physique* vous tiendra au courant des avancées dans ces domaines. Très bientôt, un article décrira les derniers résultats sur la recherche du boson de Higgs, obtenus par un accélérateur concurrent, le Tevatron, à Fermilab (USA) ; et nous consacrerons, bien sûr, un long article au démarrage du LHC.

Christophe Yèche

IRFU, CEA/Saclay - Comité de rédaction de *Reflets de la physique*

La radioactivité deux-protons

Un nouveau mode de désintégration des noyaux

Bertram Blank (blank@cenbg.in2p3.fr) et Grégory Cachel

Centre d'Études Nucléaires de Bordeaux-Gradignan, Chemin du Solarium, 33175 Gradignan Cedex

Le présent article décrit la découverte d'une nouvelle radioactivité, dite « deux-protons », prédite théoriquement et récemment mise en évidence par l'étude de la décroissance de deux noyaux exotiques riches en protons, le fer-45 et le zinc-54.

La découverte « indirecte » de la radioactivité « deux-protons » a été suivie par la visualisation directe des deux protons émis dans des chambres à projection temporelle. Ces nouvelles données permettent une confrontation des résultats expérimentaux avec les prédictions théoriques.

Ainsi, cette radioactivité « deux-protons » commence à se révéler un outil puissant en recherche sur la structure nucléaire.

Comment étudier la structure du noyau atomique ? Les physiciens utilisent principalement deux outils : les collisions entre deux noyaux (cf. encadré, p. 8) et la décroissance des noyaux radioactifs. Dans cette dernière catégorie, une nouvelle méthode basée sur la radioactivité « deux-protons », devient accessible aux expériences de physique nucléaire. La décroissance des noyaux radioactifs permet d'accéder à certaines propriétés des noyaux : le temps caractéristique au bout duquel une population de noyaux est réduite de moitié (la durée de vie) et les pourcentages des différentes voies de décroissance empruntées par le noyau (les rapports d'embranchement). Bien que ces caractéristiques pour un noyau donné ne puissent pas être modifiées par l'expérimentateur, elles contiennent néanmoins des informations très riches quant à la structure nucléaire, par exemple l'arrangement des nucléons (protons et neutrons) à l'intérieur du noyau atomique ou encore leurs interactions mutuelles.

Les radioactivités classiques [1]

La radioactivité fut découverte par Henri Becquerel en 1896. Très rapidement, Pierre et Marie Curie, ainsi qu'Ernest Rutherford, réussirent à caractériser les différents types de radioactivités naturelles. L'émission par un noyau lourd, tel l'uranium ou le thorium, d'un petit noyau d'hélium-4, constitué de deux protons et de deux neutrons, fut appelée radioactivité « alpha ». La transformation, à l'intérieur du noyau, d'un neutron excédentaire en un proton, accompagnée de l'émission de deux particules légères, fut nommée radioactivité « bêta ». Plus tard, on distinguera entre la radioactivité « bêta - » que nous venons de décrire et la radioactivité « bêta + » qui transforme un proton excédentaire en un neutron. La troisième des radioactivités « classiques » est la radioactivité « gamma ». Celle-ci ne modifie pas la composition du noyau atomique, mais lui permet de perdre son trop-plein d'énergie en le ramenant d'un état excité à un état de moindre énergie, qui peut être un autre état excité ou bien son état fondamental. Comme ces radioactivités se distinguent par la charge et la masse des particules émises, on peut les caractériser à l'aide de la déviation de ces

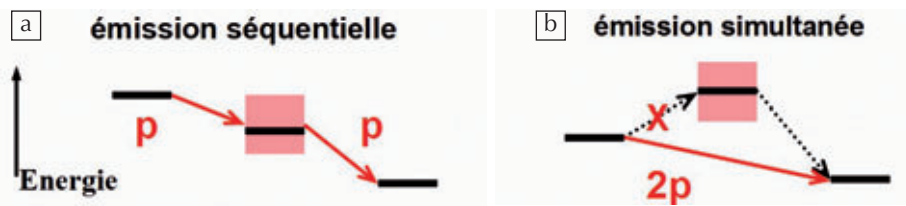
particules dans un champ magnétique perpendiculaire à leur trajectoire : si la particule alpha dévie à droite, en revanche l'électron qui est associé à la radioactivité « bêta - » part à gauche et le gamma continue tout droit.

À la suite de la découverte de ces radioactivités naturelles, Irène et Frédéric Joliot-Curie créèrent la première radioactivité artificielle [2] en bombardant une feuille d'aluminium avec des particules « alpha ». Ils réussirent à produire ainsi un isotope radioactif, donc instable : le phosphore-30. Ces travaux, effectués dans les années 1930, constituent en quelque sorte, le début de l'étude des « noyaux exotiques », noyaux comportant des rapports protons/neutrons différents de ceux trouvés dans la nature. La dernière des radioactivités considérées comme « classiques », fut découverte par Otto Hahn et Fritz Strassmann en 1938. C'est la fission spontanée d'un noyau lourd en deux morceaux plus petits et de tailles à peu près équivalentes.

Ces radioactivités ont aujourd'hui une multitude d'applications en recherche et dans l'industrie, qui vont de la médecine jusqu'à la production d'énergie. Cependant, dès les années 1960, la théorie de la structure nucléaire avait prédit l'existence d'autres types de radioactivité. Ainsi, pour des noyaux possédant un très fort excédent de protons, le théoricien russe V. Goldanskii avait proposé deux nouveaux modes de décroissance : les radioactivités « un-proton » et « deux-protons » [3].

Les radioactivités exotiques « un-proton » et « deux-protons »

Pour les noyaux très « riches en protons », la répulsion coulombienne agit comme un facteur déstabilisant, et les forces nucléaires qui règnent à l'intérieur du noyau atomique ne sont plus capables de lier tous les protons. Le noyau peut cependant réduire cette très grande instabilité en se débarrassant de quelques protons en trop. Il était donc prédit que les noyaux ayant un nombre impair de protons n'émettraient qu'un seul proton, tandis que pour des noyaux avec un nombre pair de protons, du fait de la composante de l'interaction nucléaire appelée « force d'appariement » qui favorise fortement l'association des nucléons par paires, l'émission d'un



1. L'émission de deux protons peut avoir lieu de manière séquentielle (a) où un état nucléaire intermédiaire est utilisé, ou de manière simultanée (b) quand l'état intermédiaire n'est pas accessible énergétiquement. C'est ce dernier type de décroissance qui est appelé radioactivité deux-protons.

seul proton est énergétiquement interdite ; la seule possibilité qui satisfait à la loi de conservation de l'énergie est d'émettre deux protons simultanément (fig. 1b). Ainsi, l'état nucléaire obtenu après l'émission d'un seul proton a plus d'énergie que l'état de départ, alors que l'état obtenu après l'émission de deux protons en a moins.

Au début des années 1980, la radioactivité « un-proton » fut découverte au laboratoire « Gesellschaft für Schwerionenforschung » (GSI) à Darmstadt, Allemagne. Les noyaux de lutécium-151, émetteurs proton, furent produits par des réactions de fusion d'un projectile de nickel-58 avec un noyau cible de ruthénium-96, suivies de l'évaporation d'un proton et de deux neutrons (réaction de fusion-évaporation, voir encadré p. 8, fig. b). Le lutécium-151 est alors arrêté dans un détecteur semi-conducteur silicium, décroît en émettant un proton avec une énergie cinétique de 1,23 MeV et produit ainsi un noyau d'ytterbium-150.

Aujourd'hui, près de 30 noyaux émetteurs « un-proton » sont connus. La recherche concernant ces noyaux a permis de mieux comprendre la structure des noyaux exotiques très riches en protons et, entre autres, d'établir la séquence de leurs orbitales et de leurs couches nucléaires [4].

Par contre, en ce qui concerne la radioactivité « deux-protons » recherchée dès la suggestion théorique de son existence, les premières tentatives ont connu des débuts infructueux. La difficulté provient du fait que les noyaux candidats à cette radioactivité sont nettement plus difficiles à produire que les émetteurs « un-proton ». En effet, l'appariement mentionné plus haut confère une stabilité accrue aux noyaux possédant un nombre pair de protons, ce qui autorise un excès de protons nettement plus prononcé que pour les noyaux émetteurs « un-proton ». Donc, pour arriver aux noyaux instables par rapport à l'émission de deux protons, il faut créer des noyaux

encore plus déficients en neutrons que pour les émetteurs « un-proton ». Et plus ce déséquilibre entre le nombre de protons et de neutrons s'accroît, plus les noyaux sont « exotiques », donc rares et très difficiles à produire. Il a fallu attendre les années 1990 et un développement important des techniques expérimentales pour réussir à synthétiser les premiers candidats intéressants.

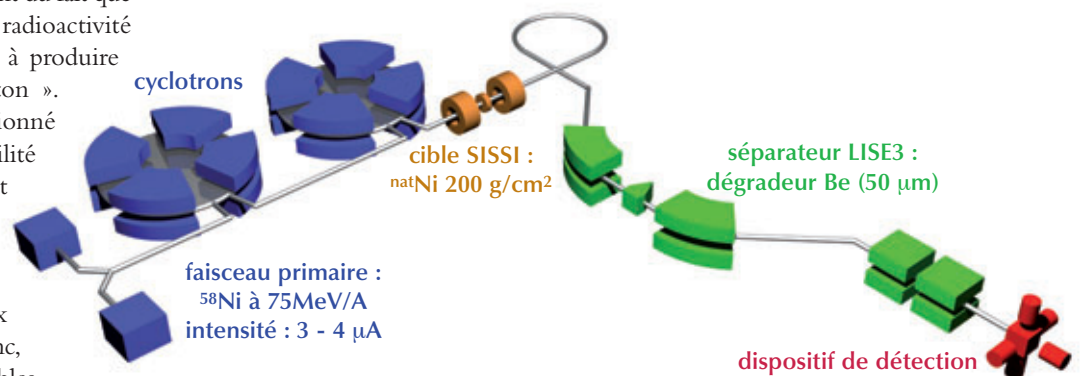
Dans les années 1990, des calculs théoriques de structure nucléaire identifiaient les noyaux de fer-45 (26 protons), de nickel-48 (28 protons) et de zinc-54 (30 protons) comme les candidats les plus prometteurs pour cette radioactivité.

Découverte de la radioactivité « deux-protons »

La radioactivité « deux-protons » fut découverte en 2002 [5] grâce à deux expériences réalisées sur l'étude de la décroissance du fer-45 et menées conjointement au Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (GANIL) à Caen [6] et au GSI [7]. Les noyaux de fer-45 furent produits par des réactions dites « de fragmentation du projectile » (p. e., dans la « cible SISSI » du GANIL – fig. 2). Dans une telle réaction, le noyau projectile, ici du nickel-58, est accéléré à une vitesse comprise entre 10% et 50% de celle de la lumière et dirigé sur un autre noyau cible. Il existe alors une

certaine probabilité pour que la cible « arrache » quelques nucléons au projectile (voir encadré p. 8, fig. d). Cette technique permet de produire des noyaux plus légers que le projectile, c'est-à-dire ayant moins de protons et/ou de neutrons, ici le fameux fer-45. Cependant, la probabilité de production varie fortement en fonction du déséquilibre entre le nombre de protons et de neutrons. Comme nous l'avons vu plus haut, les noyaux riches en protons sont difficiles à synthétiser et c'est cette raison qui rend la création de noyaux émetteurs « deux-protons » extrêmement rare. Par exemple, pour produire un seul noyau de fer-45, il faut provoquer la fragmentation de 10^{15} à 10^{16} noyaux « projectiles » stables de nickel-58.

Pour isoler les noyaux d'intérêt au milieu de l'immense majorité de noyaux produits, les expérimentateurs utilisent des séparateurs de fragments (voir, par exemple, le « spectromètre LISE3 » sur la figure 2). Ces machines tirent habilement parti de l'utilisation de champs magnétiques et électriques pour isoler les fragments recherchés. En parallèle, une parfaite identification individuelle de chaque noyau est assurée grâce à la mesure de la perte d'énergie dans les différents détecteurs et du temps que mettent les fragments à parcourir la distance de la cible aux détecteurs, le « temps de vol ». De plus, la signature de la radioactivité « deux-protons » repose sur différentes observables expérimentales : l'énergie libérée lors de la décroissance, la durée de vie du noyau émetteur, l'absence des particules légères accompagnant par exemple une désintégration bêta (voie de décroissance concurrente à la radioactivité « deux-protons ») et l'observation des caractéristiques de décroissance du noyau résultant de la radioactivité « deux-protons » (appelé « noyau fils »). Même si, prises



2. Représentation schématique de la production, de la séparation et de la détection de noyaux radioactifs au Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (GANIL) à Caen.

séparément, ces observables ne permettent pas une conclusion unique, ensemble elles n'autorisent plus alors qu'une seule interprétation cohérente : l'existence d'un nouveau mode de désintégration de la matière nucléaire, la radioactivité « deux-protons ».

La figure 3 représente le nombre de coups mesurés par intervalle de 20 keV en fonction de l'énergie. Ce spectre montre l'existence d'un pic à une valeur de 1,14 MeV, qui coïncide justement avec l'énergie prédite par plusieurs modèles théoriques pour l'émission de deux protons par le noyau de fer-45. Notre système de détection nous a aussi permis de nous assurer qu'aucune particule légère n'était présente lors de la décroissance du fer-45 comme, par exemple, un positon qui pourrait être émis lors de la décroissance concurrente bêta.

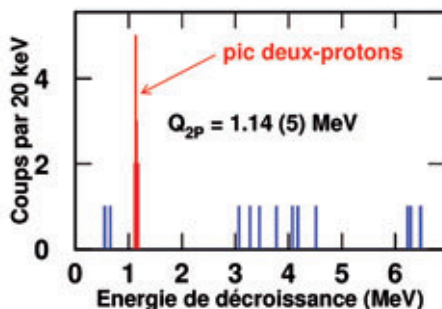
De plus, les événements en dehors du pic sont en accord avec la décroissance du noyau fils, le chrome-43, consécutive à l'émission de deux protons par le fer-45. Enfin, la durée de vie du fer-45 est en accord avec les prédictions des modèles théoriques de la radioactivité « deux-protons ».

Des résultats similaires ont été récemment obtenus pour le zinc-54 [7], un autre noyau prédit comme émetteur potentiel « deux-protons ». Ces deux noyaux sont actuellement les seuls où une telle décroissance a pu être mise en évidence. Pour le nickel-48, autre noyau candidat, les indications expérimentales ne sont actuellement pas suffisamment claires pour conclure à une émission « deux-protons ».

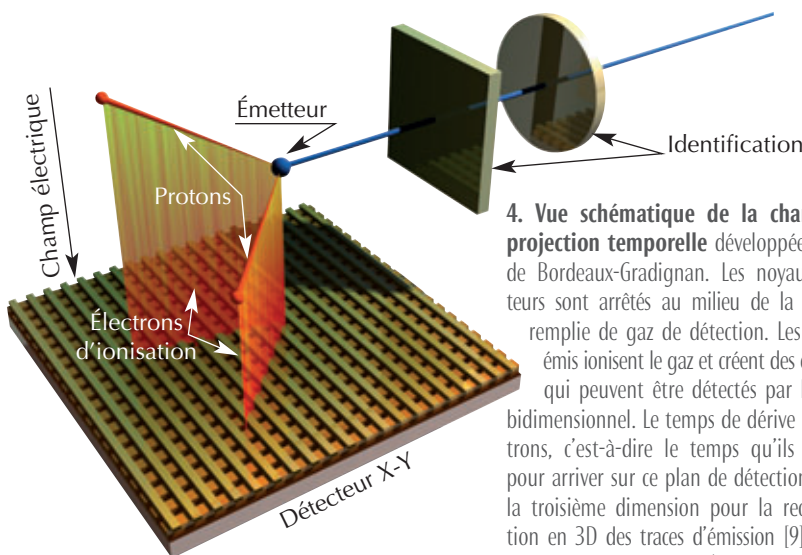
Étude du mécanisme d'émission de deux protons

La radioactivité « deux-protons » constitue une réelle découverte. Néanmoins, le mécanisme de l'émission des deux protons est encore mal connu. S'agit-il d'une émission où les deux protons sont fortement corrélés en angle et en énergie ou *a contrario* d'une émission isotrope des deux protons ? Les études menées jusqu'ici faisant appel à des détecteurs de type silicium ne permettaient pas aux protons d'échapper à ces détecteurs, car leur parcours dans le silicium est trop court (de l'ordre de 7 μm). Ainsi, seule leur énergie totale et l'absence d'autres particules telles que des positons de la radioactivité concurrente bêta+ pouvaient être détectées. Pour étudier le mécanisme d'émission, des outils expérimentaux plus raffinés et à la pointe de la technologie devaient être mis en place.

Dans cette optique, des chambres à projection temporelle (TPC pour "time projection chamber") ont été développées au CEN de Bordeaux-Gradignan (fig. 4) et à l'Université de Varsovie en Pologne. Dans ces chambres,



remplies d'un gaz de détection, les protons émis lors d'une radioactivité deux-protons ont un parcours suffisamment long (de l'ordre de 1,5 cm) pour permettre de les visualiser. Ils ionisent le gaz de détection, et les électrons de cette ionisation se déplacent dans le champ électrique de la chambre jusqu'à un détecteur plan à localisation. La lecture est soit électronique (version réalisée au CENBG avec une résolution de 200 μm), soit avec une caméra digitale (version polonaise). La hauteur de la trajectoire des protons (par rapport au plan de détection) est obtenue par le temps de dérive des électrons dans le gaz, qui est caractéristique de la hauteur à laquelle a lieu la création des électrons. Le *start* commun à toutes les voies de détection de cette mesure de temps est donné par l'arrivée des premiers électrons sur la matrice de mesure, tandis que le *stop* est enregistré par chaque voie individuellement, au moment de l'arrivée des électrons sur cette voie. Ainsi, seule une différence de temps est mesurée en chaque point de détection. Connaissant la vitesse de dérive (constante) des électrons dans le gaz, cette différence de temps permet de déterminer l'angle de la trajectoire des protons et ainsi cette trajectoire en trois dimensions.

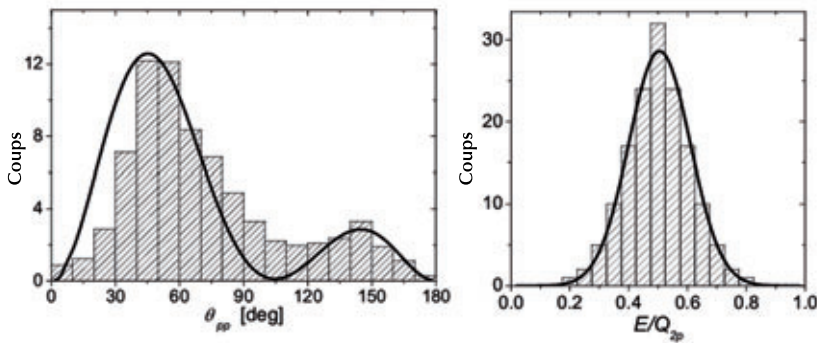


4. Vue schématique de la chambre à projection temporelle développée au CEN de Bordeaux-Gradignan. Les noyaux émetteurs sont arrêtés au milieu de la chambre remplie de gaz de détection. Les protons émis ionisent le gaz et créent des électrons, qui peuvent être détectés par le circuit bidimensionnel. Le temps de dérive des électrons, c'est-à-dire le temps qu'ils mettent pour arriver sur ce plan de détection, donne la troisième dimension pour la reconstruction en 3D des traces d'émission [9]. (Figure réalisée par J. Giovanazzo.)

3. Le pic rouge représente l'énergie correspondant à la décroissance du fer-45 par émission de deux protons ; elle est mesurée à 1,14(5) MeV. Les événements à plus haute et à plus basse énergie (en bleu) sont compatibles avec la décroissance du noyau fils, le chrome-43 [6].

Références

- 1 • En introduction, on pourra consulter R. Bimbot, *Histoire de la radioactivité*, Vuibert, Paris (2006).
- 2 • Voir l'article de P. Radvanyi, « Frédéric Joliot-Curie et la première pile atomique française », dans ce numéro, p. 17.
- 3 • V. Goldanskii, *Nucl. Phys.* **19** (1960) 482.
- 4 • B. Blank, M.J.G. Borge, *Prog. Part. Nucl. Phys.* **60** (2008) 403.
- 5 • B. Blank, *Physics World* **21**, n°5 (mai 2008) 35.
- 6 • J. Giovanazzo *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **89** (2002) 102501.
- 7 • M. Pfützner *et al.*, *Eur. Phys. J.* **A14** (2002) 279.
- 8 • B. Blank *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **94** (2005) 232501.
- 9 • B. Blank *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. B*, accepté pour publication.
- 10 • J. Giovanazzo *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **99** (2007) 102541.
- 11 • K. Miernik *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **99** (2007) 192501.
- 12 • L. Grigorenko *et al.*, *Phys. Rev.* **C64** (2001) 054002.



5. Distribution de l'angle entre les deux protons (à gauche) et de leur partage d'énergie totale (à droite) ; ce dernier est déterminé à partir des longueurs des traces des protons [11]. L'histogramme dans chaque figure présente la mesure expérimentale, et la ligne continue est le résultat du modèle à trois corps de Grigorenko *et al* [12].

Ces chambres permettent donc de reconstruire la géométrie de l'émission. La longueur des traces des protons individuels, proportionnelle à leur énergie, et leur angle relatif d'émission peuvent être déterminés.

Ces mesures ont permis d'observer pour la première fois directement les deux protons émis lors de la radioactivité deux-protons du fer-45 [10]. Notamment, les résultats du groupe de Varsovie, obtenus lors d'une expérience en 2007 à Michigan State University aux USA [11], ont montré que les modèles schématiques proposés au début des études théoriques de la radioactivité deux-protons, le modèle dit « hélium-2 » qui préconise une très forte corrélation angulaire des deux protons, et le modèle de « l'espace de phase » qui ne

prédit aucune corrélation et respecte uniquement la conservation de l'énergie et du moment, sont trop simples pour prendre en compte la complexité des forces nucléaires. Par contre, le modèle à trois corps développé par L. Grigorenko *et al.*, qui modélise la désintégration avec des forces réalistes entre les deux protons et entre un proton et le noyau résiduel après l'émission des deux protons, semble être en excellent accord avec les résultats expérimentaux (fig. 5). Cette approche permet, au moins dans le cadre de ce modèle relativement simple, de déterminer des détails de la fonction d'onde des deux protons avant leur émission.

Ainsi, la nouvelle radioactivité deux-protons a ouvert une fenêtre pour sonder les forces

nucléaires. En particulier, une partie de ces forces, la force d'appariement des nucléons, pourra être étudiée dans l'avenir avec ce nouvel outil.

Perspectives des études avec la radioactivité deux-protons

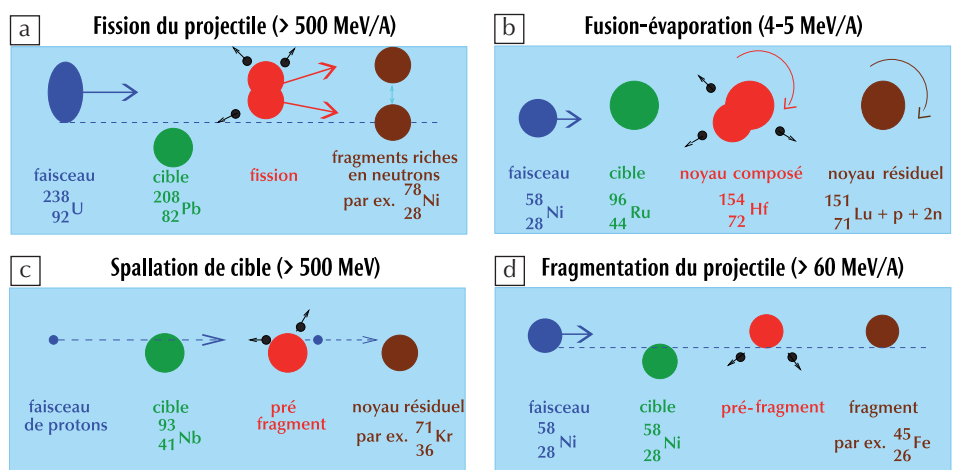
Pour arriver à une comparaison approfondie des résultats expérimentaux avec les modèles de la théorie nucléaire et ainsi améliorer notre compréhension de la structure du noyau atomique, d'autres études doivent être menées. Il faut dans un premier temps enrichir les résultats expérimentaux en étudiant d'autres noyaux émetteurs deux-protons. Des études avec des détecteurs de type silicium qui permettent une mesure de haute précision de l'énergie de décroissance, de la durée de vie et des différentes branches de décroissance sont à entreprendre, tout comme des mesures avec les TPC, qui nous autorisent à étudier en profondeur le mécanisme de décroissance.

En parallèle, le développement théorique doit continuer pour arriver à une description cohérente de la structure nucléaire et de la dynamique de l'émission. Évidemment, ce développement n'est pas simple et de nouvelles idées doivent être proposées pour faire de la radioactivité deux-protons un outil d'étude puissant de la structure du noyau atomique. ■

►► COLLISIONS ENTRE NOYAUX ATOMIQUES

Pour créer en laboratoire des noyaux radioactifs qui n'existent pas dans la nature, le physicien utilise des collisions entre deux noyaux stables.

L'expérimentateur a le libre choix du couple de noyaux qu'il désire faire interagir et de l'énergie avec laquelle leur rencontre doit s'effectuer. De ces deux paramètres dépendra le type de réaction qui aura lieu et les caractéristiques des interactions. Ainsi, en utilisant par exemple un noyau très lourd tel que l'uranium comme cible ou projectile, une réaction de **fission** peut être provoquée. En variant l'énergie du projectile incident sur la cible, des réactions élastiques ou inélastiques peuvent se produire, conduisant dans certains cas à la **fusion** du projectile et de la cible, ou à la **spallation/fragmentation** (abrasion de quelques nucléons) de l'un des deux ou des deux à la fois.



Schémas des différentes réactions nucléaires utilisées pour produire des noyaux exotiques ou pour étudier leur structure. (A : nombre de nucléons du projectile). Dans la fission (a), un noyau lourd est cassé en deux morceaux riches en neutrons, de tailles à peu près similaires. Le contraire est fait dans la fusion (b) : deux noyaux de tailles comparables s'approchent avec une vitesse juste suffisante pour vaincre la répulsion mutuelle due à la charge positive des deux noyaux. Après évaporation de particules légères (protons, neutrons ou particules alpha), le noyau final est créé. Dans la spallation (c) et la fragmentation (d), un noyau, respectivement cible ou projectile, est cassé. Avec une certaine probabilité, le noyau d'intérêt est alors produit après évaporation de quelques particules légères.

Instabilités de flambage dans les fluides visqueux

Du laboratoire au manteau terrestre

Neil M. Ribe¹ (ribe@ipgp.jussieu.fr), Mehdi Habibi^{2,3}, Daniel Bonn^{3,4}, Éléonore Stutzmann¹

1 - Institut de Physique du Globe de Paris et Université de Paris 7, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05.

2 - Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan 45195-1159, Iran.

3 - Laboratoire de Physique Statistique, École Normale Supérieure, 75231 Paris Cedex 05.

4 - Van der Waals-Zeeman Institute, University of Amsterdam, 1018 XE Amsterdam, Pays-Bas.

Un mince filet de fluide visqueux qui tombe sur une surface s'enroule en hélice tournante, alors que le même fluide en forme de nappe se replie de manière périodique. Ces instabilités, dites « de flambage », cachent une physique d'une grande complexité, avec notamment quatre régimes qui correspondent aux différents équilibres des forces visqueuse, gravitationnelle et inertielle. La gamme de leurs applications va des industries de l'alimentation et de fabrication des polymères jusqu'à la dynamique du manteau de notre planète.



© Fabrice Frankel, MIF



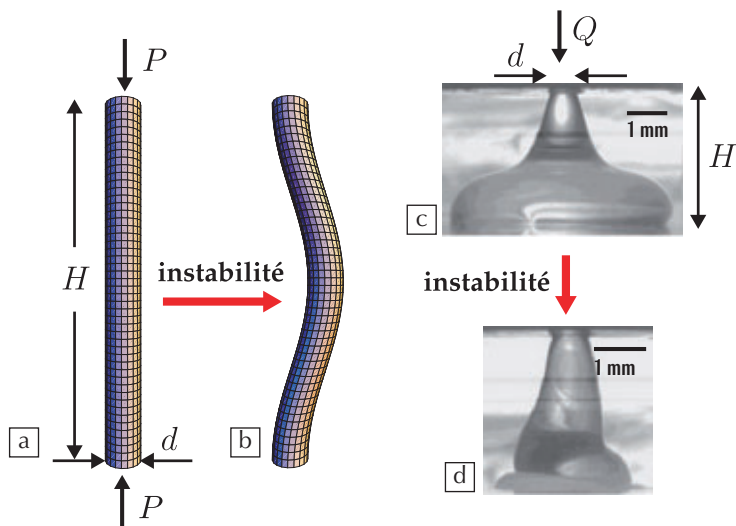
© Marc Ihle

1. Instabilités de flambage dans les fluides visqueux. (a) Enroulement d'un filet d'huile de silicone. (b) Repliement périodique d'une nappe de chocolat fondu.

À votre petit déjeuner demain matin, laissez tomber un mince filet de miel d'une hauteur d'une dizaine de cm sur une tartine : le filet s'enroulera sur lui-même pour former un petit « tire-bouchon tournant » (fig. 1a). Si vous n'aimez pas le miel, versez sur votre tartine une nappe de chocolat fondu : elle se pliera de manière périodique (fig. 1b). Ce sont deux beaux phénomènes de mécanique des fluides qui se manifestent dans des situations très diverses, du remplissage des boîtes dans l'industrie de l'alimentation jusqu'à la subduction des plaques tectoniques dans le manteau terrestre. Mais la simplicité de leur réalisation cache une physique d'une étonnante complexité, qui attire l'attention des spécialistes depuis une cinquantaine d'années. Pour notre part, nous essayons depuis quelque temps de jeter un nouveau regard sur ces phénomènes, en combinant des approches expérimentale, analytique, numérique et (pour le volet géophysique de l'étude) observationnelle.

L'enroulement et le repliement périodique sont deux exemples des *instabilités de flambage*,

où un objet mince se plie sous l'influence d'une compression axiale [1]. L'exemple type en est une tige élastique en forme de cylindre droit de longueur H , diamètre d et module élastique E , soumise à une force axiale compressive P (fig. 2a). Lorsque $H > H_c = A d^2 (E/P)^{1/2}$ où A est une constante dont la valeur dépend des conditions aux limites aux deux extrémités, la tige devient instable et se plie (fig. 2b). Pour créer un système analogue avec un fluide visqueux de viscosité ν , densité ρ et capillarité γ , on le fait extruder à un débit volumétrique constant Q par un trou de diamètre d vers une surface solide à une distance H plus bas (fig. 2c). La « tige » de fluide ainsi générée s'épaissit fortement vers le bas à cause de la force compressive axiale que crée l'écrasement du fluide contre la surface. Une analyse de cette situation [2] montre que l'instabilité se manifeste sous forme d'une oscillation flexurale (fig. 2d) lorsque H atteint une valeur critique $H_c = Bd$, où B ($= 3$ à 15) augmente en fonction de γ , mais ne dépend que faiblement de ν et de Q . Le résultat est le même



2. Démarrage des instabilités de flambage pour une tige élastique soumise à une force compressive (a, b) et pour une « tige » de fluide visqueux extrudée par un trou vers le bas (c, d).

(à des facteurs numériques près) pour le démarrage du repliement d'une nappe.

Or, comprendre le démarrage des instabilités de flambage n'est qu'un début : il nous reste à explorer l'énorme domaine $H > H_c$ du flambage à amplitude finie. Dans ce dessin, nous avons choisi de focaliser notre attention sur le cas de l'enroulement d'un filet, plus simple à étudier (à la fois expérimentalement et numériquement) que le repliement d'une nappe.

Mesures en laboratoire

La figure 3 montre notre dispositif expérimental, où un mince filet d'huile de silicone ($\rho = 0,97 \text{ g.cm}^{-3}, \gamma = 21,5 \text{ dyne.cm}^{-1}$), de viscosité 3×10^4 ou 10^5 fois celle de l'eau, est extrudé de façon continue par une pompe à seringue. Cette figure montre aussi la forme typique du filet lorsque $H \gg H_c$, avec une partie supérieure quasi verticale et fortement amincie vers le bas par la gravité (la « queue »), et une partie hélicoïdale (le « tire-bouchon ») tout en bas. Nous nous intéresserons surtout à la fréquence angulaire Ω de l'enroulement autour d'un axe vertical (fig. 3b).

La figure 4 présente une sélection de nos mesures de Ω en fonction de H (symboles rouges). Elles sont d'une étonnante diversité. Si H est faible, Ω décroît en fonction de H (fig. 4a, $H < 1 \text{ cm}$). Par contre, si $H \sim$ plusieurs dizaines de cm, Ω augmente rapidement en fonction de H (fig. 4b). De plus, pour des valeurs intermédiaires de H il peut y avoir des « trous » dans les courbes de mesures, où des fourchettes entières de valeurs de Ω sont absentes (fig. 4b, $\Omega \sim 15$ à 30 s^{-1}). En fait, chaque trou correspond à une oscillation entre deux états métastables d'enroulement avec des fréquences différentes

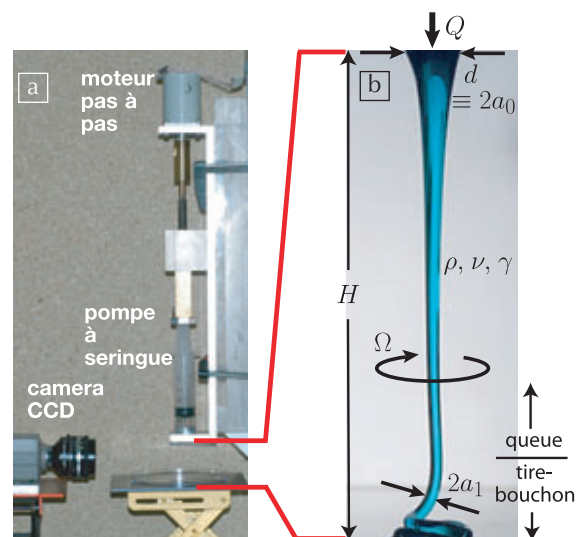
(fig. 4b, encart). Ce phénomène devient encore plus marqué si l'on augmente la viscosité ou diminue le taux d'extrusion Q : on observe alors plusieurs trous entre des paliers quasi horizontaux, où se regroupent tous les points expérimentaux (fig. 4c).

Au premier abord donc, l'instabilité de l'enroulement semble receler tout et son contraire : diminution et augmentation de la fréquence avec la hauteur, variations continues et discontinues de la fréquence, comportements réguliers et irréguliers. Comment expliquer une telle diversité dans un seul phénomène ?

Une approche théorique

Notre approche utilise un modèle numérique basé sur une théorie qui décrit le mouvement arbitraire d'un filet de fluide « mince », dont le rayon est faible comparé au rayon de courbure de son axe. Cette théorie prend en compte quatre forces qui agissent sur le filet. Tout d'abord, il y a la gravité. Viennent ensuite les forces visqueuses qui résistent aux quatre modes de déformation possibles du filet : extension/compression axiales, flexion dans deux plans orthogonaux, et torsion. Troisièmement, les « forces » inertielles (centrifuge et de Coriolis) associées à la rotation du tire-bouchon ainsi que l'accélération du fluide dans ce repère tournant deviennent importantes lorsque l'enroulement se produit à haute fréquence. La liste des forces est complétée par la capillarité qui a une influence significative (5 à 20%), mais pas déterminante.

La forme finale de la théorie est un système d'équations d'ordre 17 qui décrit l'état stationnaire (dans le repère tournant) du filet, et que l'on peut résoudre



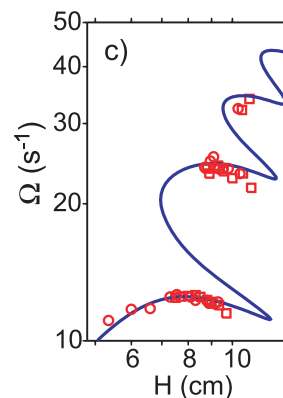
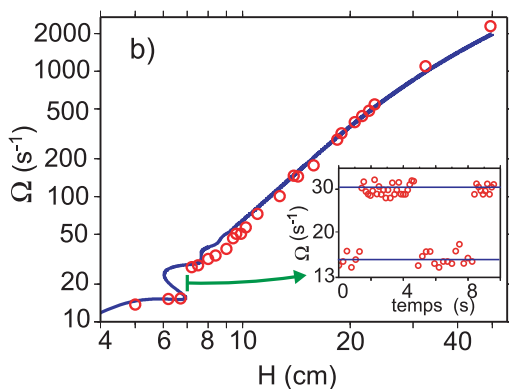
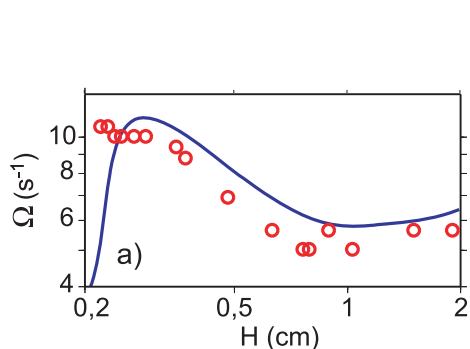
3. Dispositif expérimental pour étudier l'enroulement d'un filet de fluide visqueux (a) et définition des paramètres de l'enroulement (b).

numériquement [3]. Les lignes continues sur la figure 4 en montrent les prédictions, pour les mêmes valeurs de ν, γ, d , et Q que dans l'expérience de laboratoire correspondante. L'accord entre la théorie et les expériences est remarquable, d'autant plus que le modèle ne comporte aucun paramètre ajustable. Notre tâche maintenant est de comprendre ce que cet accord signifie en termes physiques.

Quatre régimes d'enroulement

Regardons d'abord la partie « tire-bouchon » du filet (fig. 3b), où la déformation est essentiellement de type flexural et torsionnel. Étant donné ces types de déformation, la théorie du filet « mince » nous permet de constater que trois différents types d'équilibre (« régimes ») entre les forces visqueuse, gravitationnelle et inertielle sont possibles. Dans le régime « visqueux » (V) d'abord, à faible hauteur H et faible fréquence Ω , la gravité et l'inertie sont négligeables devant les forces visqueuses. Ces dernières s'équilibrent donc toutes seules, comme dans de la pâte dentifrice qui sort lentement d'un tube sur une brosse à dents. Dans le régime « gravitationnel » (G) ensuite, les forces visqueuses sont équilibrées par la gravité. Et lorsque l'enroulement se produit à très haute fréquence enfin, les forces visqueuses peuvent être contrebalancées par l'inertie dans un régime « inertiel » (I). Or, ces trois équilibres conduisent à trois lois d'échelle différentes pour la variation de la fréquence d'enroulement en fonction des paramètres expérimentaux [3-5] :

$$\begin{aligned} \Omega_V &= Q/(a_1^2 H), \\ \Omega_G &= [g Q^3/(\nu a_1^8)]^{1/4}, \\ \Omega_I &= [Q^4/(\nu a_1^{10})]^{1/3}. \end{aligned} \quad (1)$$



4. Fréquence d'enroulement en fonction de la hauteur de chute sous différentes conditions. Symboles rouges : mesures expérimentales ; lignes bleues : calculs numériques. (a) $d = 0,068$ cm, $Q = 0,0038$ cm³ s⁻¹, $\nu = 1000$ cm² s⁻¹. (b) Cas avec un trou et un débit beaucoup plus grands ($d = 0,5$ cm, $Q = 0,094$ cm³ s⁻¹) et une viscosité plus faible ($\nu = 300$ cm² s⁻¹). (c) comme (a), mais avec un débit plus faible ($Q = 0,00215$ cm³ s⁻¹). L'encart dans (b) montre la fréquence en fonction du temps pour $H = 7$ cm.

Notons enfin que ces trois expressions font intervenir le rayon a_1 du filet dans le tire-bouchon, qui dépend de l'ampleur de l'étirement gravitationnel de la « queue » du filet (fig. 3b). Le rayon a_1 est quasiment constant ($= a_0$) dans le régime V, mais il diminue avec la hauteur H dans les régimes G et I. En conséquence, la fréquence Ω_V décroît en fonction de H , alors que Ω_G et Ω_I augmentent.

Jusqu'à présent, nous avons considéré la queue du filet comme un objet passif, dont la seule fonction serait de fixer a_1 . Or, la queue peut aussi jouer un rôle actif, en exécutant des oscillations transverses libres qui correspondent à un quatrième régime « pendulaire » (P). Les fréquences naturelles de ces oscillations sont toutes proportionnelles à la fréquence

$$\Omega_P = (g/H)^{1/2} \quad (2)$$

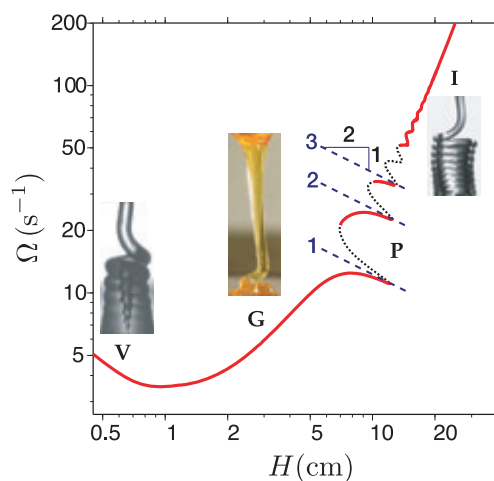
d'un pendule simple, avec des constantes de proportionnalité qui dépendent de la distribution non uniforme de la masse du fluide (fig. 3b) le long de l'axe de la queue [6].

L'assemblage du puzzle

Les quatre lois d'échelle (1) et (2) reflètent tous les différents types d'équilibres de force possibles dans un filet qui s'enroule. Nous sommes donc en mesure d'assembler les morceaux du « puzzle » physique que nous avons déjà vu « en vrac » (fig. 4). Dans ce dessin, traçons (fig. 5) la variation théorique (calculée numériquement) de la fréquence Ω en fonction de la hauteur H pour les paramètres de l'expérience de la figure 4c. En comparant les différentes parties de cette courbe avec nos lois d'échelle, on s'aperçoit que les quatre régimes d'enroulement (V, G, P et I) se succèdent dans un ordre invariable lorsque la hauteur de chute augmente.

Pour $H < 0,8$ cm, où l'enroulement se produit à basse fréquence, et la pesanteur et l'inertie du fluide sont négligeables devant les forces

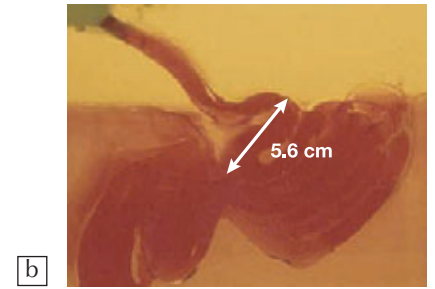
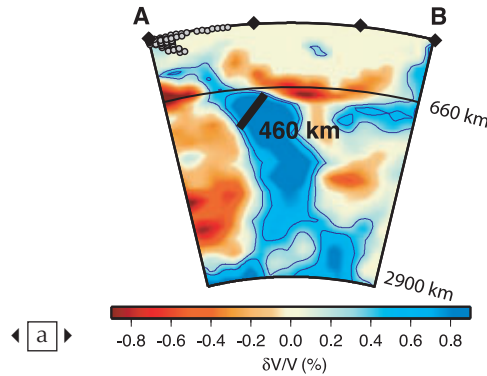
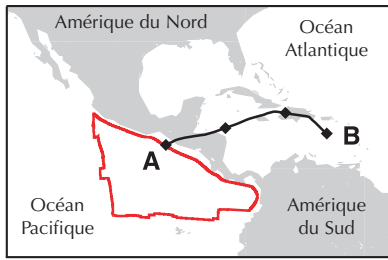
visqueuses, l'enroulement se produit donc en régime visqueux (V), et la fréquence décroît à quel point le filet ressemble dans ce régime à de la pâte dentifrice. Pour $1 \text{ cm} < H < 7$ cm, la pesanteur du filet commence à se faire sentir, et le régime gravitationnel (G) prend la relève. La fréquence augmente avec la hauteur, et le filet commence à développer la structure « queue + tire-bouchon » (fig. 5, image G). Pour $7 \text{ cm} < H < 14$ cm ensuite, le filet entre dans le régime pendulaire (P) où jusqu'à trois états d'enroulement de fréquences différentes sont possibles pour une seule et même hauteur de chute. C'est un régime de résonance, où les oscillations transverses de la queue sont excitées lorsqu'une de ses fréquences naturelles (lignes droites en tirets longs avec pente $-1/2$) est proche de la fréquence Ω fixée par le tire-bouchon. Les parties de la courbe en pointillés correspondent aux états qui sont instables par rapport à de petites perturbations et qui ne



5. Vue d'ensemble des régimes d'enroulement V, G, P et I, sous la forme d'une courbe de la fréquence en fonction de la hauteur de chute pour les paramètres d'une expérience en laboratoire [6].

Bibliographie

- 1 • A. Bejan, "Buckling Flows: A New Frontier in Fluid Mechanics", *Annual Review of Numerical Fluid Mechanics and Heat Transfer* (1987), Vol. 1. Editors: T. C. Chawla, Hemisphere, Washington, DC, 262-304.
- 2 • B. Tchavdarov *et al.*, "Buckling of thin liquid jets", *Journal of Fluid Mechanics*, **253** (1993), 593-615.
- 3 • N.M. Ribe, "Coiling of viscous jets", *Proceedings of the Royal Society of London*, **A460** (2004), 3223-3239.
- 4 • L. Mahadevan *et al.*, "Correction: Fluid 'rope trick' investigated", *Nature*, **403** (2000), 502.
- 5 • M. Maleki *et al.*, "Liquid rope coiling on a solid surface", *Physical Review Letters*, **93** (2004), 214502.
- 6 • N.M. Ribe *et al.*, "Multiple coexisting states of liquid rope coiling", *Journal of Fluid Mechanics*, **555** (2006), 275-297.
- 7 • L. Guillou-Frottier, J. Buttles, P. Olson, "Laboratory experiments on the structure of subducted lithosphere", *Earth and Planetary Science Letters*, **133** (1995) 19-34.
- 8 • N.M. Ribe, "Periodic folding of viscous sheets", *Physical Review E*, **68** (2003) 036305.
- 9 • N.M. Ribe *et al.*, "Buckling instabilities of subducted lithosphere beneath the transition zone", *Earth and Planetary Science Letters*, **254** (2007), 173-179.



6. Repliement d'une plaque de lithosphère plongeant dans le manteau terrestre, et expérience analogique de laboratoire. (a) Coupe tomographique à travers le manteau sous l'Amérique centrale, montrant l'anomalie (bleue) de la vitesse des ondes élastiques de cisaillement qui correspond à la plaque subduite dans le passé. Les frontières actuelles de la plaque Cocos en surface sont indiquées en rouge sur la carte. (b) En laboratoire, une nappe de sirop de sucre très visqueux (rouge) injectée dans une cuve subit une instabilité de flambage à l'interface entre deux couches (orange et jaune) de sirop de sucre moins visqueux [7].

sont donc pas observables, ce qui explique les « trous » entre les paliers de mesures dans la figure 4c. Enfin, pour $H > 15$ cm, le filet entre dans le régime inertiel (I), où la fréquence augmente rapidement en fonction de la hauteur et où la structure en « tire-bouchon » est très bien développée.

Une autre échelle : le manteau terrestre

À des échelles d'espace et de temps beaucoup plus grandes, des instabilités de flambage peuvent se produire dans le manteau de notre planète. Il s'agit ici d'une géométrie différente – le repliement d'une nappe plutôt que l'enroulement d'un filet – mais la physique est la même que celle que l'on vient d'expliquer.

Le « manteau » est la partie de la Terre située entre le noyau de fer liquide (2900 km de profondeur) et la croûte sous nos pieds (6 km d'épaisseur sous les océans). Bien que le manteau soit « solide » sur des échelles de temps courtes (e.g., celles de la propagation des ondes sismiques), il se déforme comme un fluide sur des échelles de temps géologiques. Cet écoulement prend la forme d'une convection très lente, dont le moteur est la variation de la densité des roches due aux variations de température et de composition chimique. La forte variation de la viscosité de ces roches avec la température fait que la partie supérieure froide du manteau est très forte mécaniquement : c'est la « lithosphère », dont l'épaisseur maximum est de 80–100 km sous les océans. Par des mécanismes qui restent encore mal compris, elle se casse en gros morceaux (« plaques ») de 1000–10000 km de large, qui se déplacent latéralement et qui parfois replongent dans le manteau. Ce replongement s'appelle la « subduction ».

Une question évidente concerne le sort réservé à la partie déjà subduite d'une plaque : jusqu'à quelle profondeur plonge-t-elle, et

comment se déforme-t-elle en chemin ? Pour y répondre, il faut demander aux sismologues, qui savent cartographier la distribution tridimensionnelle des vitesses des ondes élastiques dans le manteau à partir d'enregistrements de tremblements de terre. Leur méthode, un peu analogue à la tomographie médicale mais à l'échelle du globe, consiste à examiner les temps de trajet des différentes ondes sismiques ayant traversé un volume donné du manteau pour savoir si leur vitesse y est plus rapide ou plus lente que la moyenne.

À titre d'exemple, la figure 6a montre une image tomographique d'une coupe verticale de la zone de subduction où la plaque Cocos plonge sous l'Amérique Centrale. Les couleurs bleues (orange) indiquent les endroits où la vitesse des ondes de cisaillement est plus rapide (lente) que la moyenne à cette profondeur, parce que la température y est plus basse (élevée). Or, vu qu'une plaque en subduction est plus froide que le manteau qui l'entoure, on peut conclure que l'anomalie bleue dans la figure 6a correspond à la partie de la plaque Cocos qui a été subduite dans le passé. Cette anomalie, plutôt mince dans le manteau supérieur (< 660 km de profondeur), s'épaissit rapidement ensuite pour atteindre une largeur de 600–700 km dans le manteau inférieur. Pourquoi ?

Une explication est suggérée par une expérience analogique ([7] ; fig. 6b). On remplit d'abord une cuve avec deux couches de sirop de sucre ayant des viscosités différentes, qui représentent les parties supérieure (moins visqueuse ; jaune) et inférieure (plus visqueuse ; orange) du manteau. Ensuite, on injecte d'en haut une nappe de sirop de sucre encore plus visqueux (rouge). En rencontrant l'interface entre les deux couches de sirop, la nappe subit une instabilité de flambage, créant ainsi une masse de sirop plié dont la forme ressemble à

celle de l'anomalie bleue dans la figure 6a. Pour vérifier que cette ressemblance n'est pas due au hasard, on fait appel à une loi d'échelle universelle pour l'amplitude δ du flambage d'une nappe bidimensionnelle sans inertie en fonction de son épaisseur, sa viscosité, la vitesse d'injection et la hauteur de chute [8]. Pour l'expérience de la figure 6b, la loi prédit $\delta = 5,7$ cm, en excellent accord avec l'amplitude mesurée (5,6 cm). Pour la subduction sous l'Amérique centrale, un calcul similaire donne $\delta = 460$ km ([9] ; fig. 6a, ligne noire), en bon accord avec la dimension de l'anomalie tomographique bleue. L'hypothèse d'une instabilité de flambage sous cette région semble donc raisonnable.

Conclusion

Les instabilités de flambage dans les fluides visqueux fascinent pour plusieurs raisons : la physique complexe qu'elles recèlent ; leur apparition à des échelles très disparates, du laboratoire au manteau terrestre ; et leur beauté, tout simplement. Si leur dynamique est désormais comprise dans ses grandes lignes, il reste néanmoins plusieurs questions ouvertes. Côté géophysique, nous étudions actuellement comment la présence d'un fluide visqueux ambiant (le « manteau ») influence le flambage d'une nappe ; et nous attendons avec impatience le jour où la tomographie sismique aura une résolution suffisante pour vérifier la présence des « plis » individuels dans les plaques subduites. Quant à l'enroulement, nos expériences récentes ne cessent de révéler des surprises : instabilités secondaires du tire-bouchon, ondes spirales de bulles d'air piégées, oscillations entre enroulement et repliement d'un filet, cessation hystérétique de l'enroulement à de très grandes hauteurs de chute... Autant de phénomènes qui restent à expliquer. Affaire à suivre... ■

Le méthane dans l'atmosphère de Titan

De la spectroscopie fondamentale à la planétologie*

Vincent Boudon¹(Vincent.Boudon@u-bourgogne.fr), Jean-Paul Champion¹, Tony Gabard¹, Michel Loëte¹, Athéna Coustenis², Catherine de Bergh², Bruno Bézard², Emmanuel Lellouch², Pierre Drossart², Mathieu Hirtzig^{2,3}, Alberto Negrão^{4,5}, Caitlin A. Griffith⁶

1 - Institut Carnot de Bourgogne, UMR 5209 CNRS-Université de Bourgogne, BP 47870, 21078 Dijon

2 - LESIA, Observatoire de Paris-Meudon, 92195 Meudon

3 - Planetary Science Laboratory, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109-2143, USA

4 - Istituto di Fisica dello Spazio Interplanetario, 00133 Rome, Italie

5 - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, s/n 4200-465, Porto, Portugal

6 - Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona, Tucson, AZ 85721, USA

Le méthane (CH₄) joue sur Titan, le plus gros satellite de Saturne, un rôle similaire à celui de l'eau sur Terre. Il y est de plus à l'origine d'une chimie organique complexe. La spectroscopie étant la technique privilégiée pour mesurer le CH₄ dans les atmosphères planétaires, des modèles précis de l'absorption de la lumière par cette molécule doivent être développés. Les résultats récents obtenus dans ce domaine à l'Institut Carnot de Bourgogne, en collaboration étroite avec des planétologues, permettent notamment de contribuer à l'interprétation des résultats de la mission Cassini-Huygens.

La molécule de méthane (CH₄) est relativement abondante dans l'Univers. Sur Terre, elle est le principal composant du gaz naturel et il s'agit du second gaz à effet de serre d'origine anthropique, après le gaz carbonique. Elle est également présente en quantités importantes dans l'atmosphère d'un certain nombre d'objets extraterrestres : les planètes géantes du Système solaire (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune), mais aussi Titan (satellite de Saturne), Triton (satellite de Neptune), Pluton et, plus loin, les naines brunes, certaines étoiles « froides » et les exoplanètes géantes.

La méthode privilégiée pour la détermination de la composition chimique et des conditions physiques de ces atmosphères planétaires est la spectroscopie. Cette technique de diagnostic optique permet d'identifier les espèces chimiques d'après la lumière qu'elles absorbent ou réémettent aux différentes longueurs d'onde.

La compréhension du spectre d'une atmosphère planétaire nécessite donc de pouvoir modéliser correctement celui de ses différents composés. Par ailleurs, le spectre de ces atmosphères est largement dominé par les fortes bandes d'absorption du méthane, du fait de son abondance substantielle. Aussi, la détection des autres

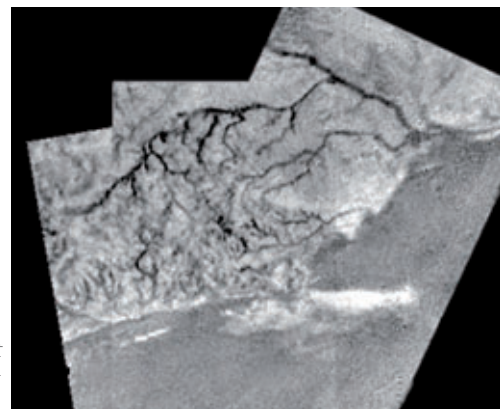
composés minoritaires (molécules organiques complexes...) nécessite de pouvoir « soustraire » le spectre de CH₄, et donc de disposer pour celui-ci d'un modèle extrêmement fiable, valide sur une large gamme de longueurs d'onde (depuis les micro-ondes jusqu'au proche infra-rouge). Ajoutons que, même observé à basse ou moyenne résolution, le profil d'un spectre d'absorption dépend de la structure fine sous-jacente. Sa modélisation requiert donc l'analyse de spectres de laboratoire à haute résolution, ce qui implique l'étude d'un nombre extrêmement grand d'états quantiques, et donc l'identification d'un très grand nombre de raies spectrales.

Le méthane sur Titan

Titan, la plus grosse lune de Saturne, a un diamètre de 5150 km et possède une épaisse atmosphère, composée principalement d'azote (98 % en moyenne) qui n'absorbe pas la lumière, mais aussi d'une quantité importante de méthane, ainsi que d'un grand nombre d'autres molécules organiques, signe d'une activité chimique complexe.

La température de surface de Titan est de seulement -179 °C et l'eau n'y existe que sous forme de glace. Le méthane joue sur Titan un rôle semblable à celui de l'eau sur Terre. Il est présent sous forme de gaz dans l'atmosphère, forme des nuages et il existe de toute évidence des pluies de méthane, des rivières (fig.1) et des lacs de méthane mélangé à de l'éthane.

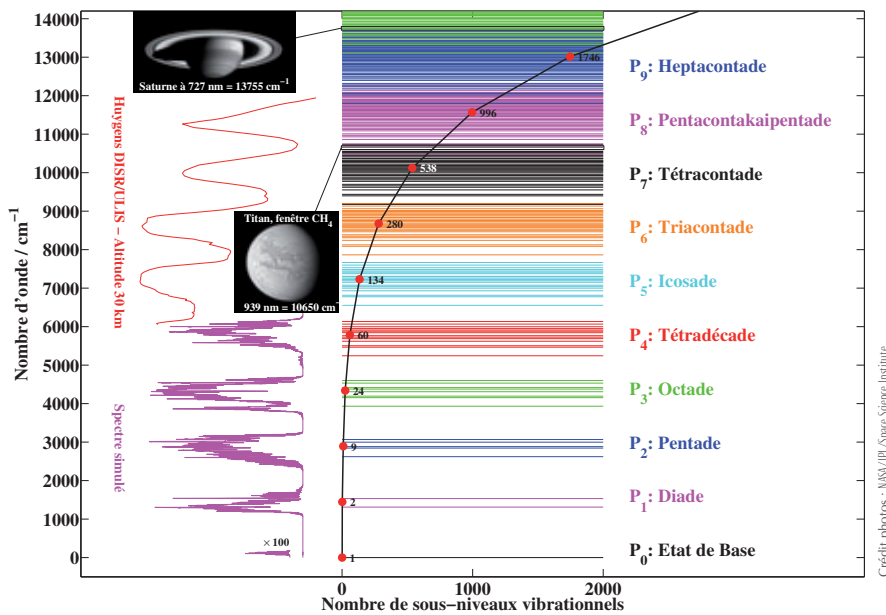
Cette vision de Titan est principalement issue des observations et mesures effectuées par les sondes spatiales comme Voyager 1 en 1980 et surtout la mission Cassini-Huygens (NASA/ESA/ASI) qui, depuis juillet 2004, a révolutionné notre connaissance du système de Saturne et en particulier de Titan. Le point d'orgue en fut la descente dans l'atmosphère de Titan et l'atterrissage à sa surface de la sonde européenne Huygens, le 14 janvier 2005.



1. Rivières de méthane « asséchées » photographiées par la sonde Huygens lors de sa descente sur Titan.

© NASA/JPL Space Science Institute

* Une version longue de cet article est parue en mai 2008, dans *uB Sciences* n°3, la revue de la recherche de l'Université de Bourgogne.



à la formation de nitriles tel que le cyanure d'hydrogène (HCN). La polymérisation de certains composés donne naissance à un matériau complexe constituant les particules solides de la brume orangée qui emplit l'atmosphère. Celles-ci servent de noyaux de condensation pour l'éthane et d'autres gaz, et tombent continuellement à la surface de Titan. Tout ceci permet de dresser le schéma d'un véritable « cycle du méthane » sur Titan, à l'image du cycle de l'eau sur Terre.

La spectroscopie étant l'un des principaux outils d'étude de la physico-chimie de l'atmosphère de Titan, il est nécessaire de pouvoir disposer de modèles très fiables du spectre de CH_4 . Une forte interaction entre planétologues et spectroscopistes est donc indispensable.

Le spectre du méthane

La simplicité de la molécule de méthane n'est qu'apparente, surtout si l'on considère la structure fine de son spectre d'absorption. CH_4 possède plusieurs particularités spectroscopiques remarquables. Tout d'abord, cette molécule est très symétrique, les quatre atomes d'hydrogène étant placés aux sommets d'un tétraèdre régulier. Une seconde caractéristique essentielle du spectre du méthane est liée à l'organisation de ses niveaux d'énergie. Les fréquences caractéristiques de vibration des atomes de la molécule, au nombre de quatre, présentent entre elles des rapports simples.

2. La complexité du spectre du méthane. Les traits horizontaux représentent les niveaux d'énergie de vibration. La courbe noire donne le nombre de sous-niveaux vibrationnels par polyade. Les noms correspondent aux différentes bandes d'absorption. Différentes régions spectrales sont illustrées par des images et des spectres : en mauve, un spectre simulé des polyades inférieures ; en rouge, un exemple de spectre enregistré sur Titan par la sonde Huygens.

L'orbiteur Cassini continue de survoler Titan régulièrement afin de l'observer avec ses différents instruments (caméras, spectromètres, radar...), complétant ainsi les observations effectuées depuis l'orbite terrestre (télescope spatial Hubble, satellite ISO) ou depuis le sol à plus haute résolution spectrale (télescopes CFHT, VLT, Keck...).

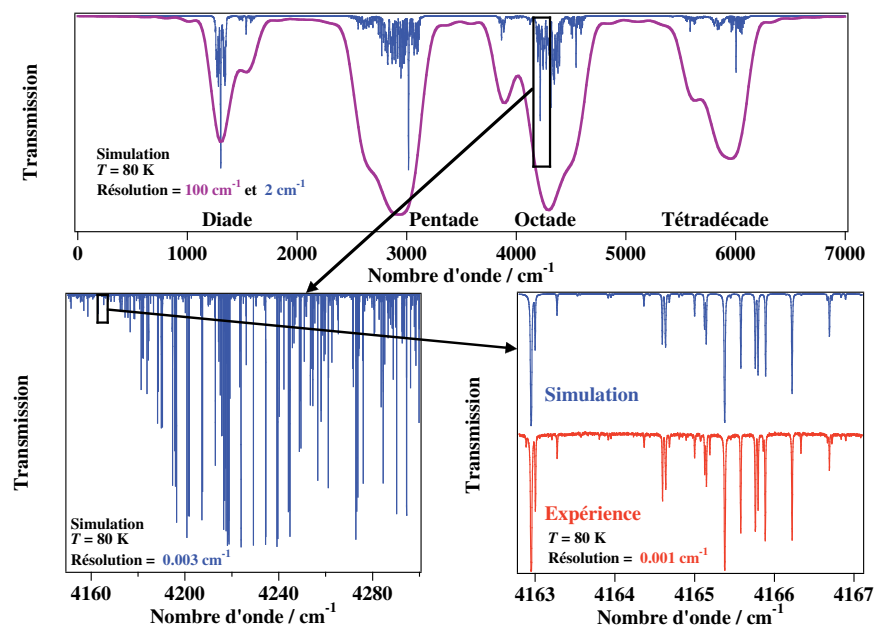
Les spectres enregistrés par l'instrument DISR de la sonde Huygens au cours de sa descente dans l'atmosphère de Titan, qui a duré 2 h 30, sont dominés par une série de larges bandes d'absorption régulièrement espacées, dues au méthane.

Les images prises lors de la descente de Huygens, combinées aux images radar de l'orbiteur Cassini fournissent d'autres informations. Environ 1% de cette surface est recouvert par des réseaux fluviaux (fig. 1). Les régions polaires sont en grande partie couvertes de larges étendues lisses, interprétées comme des lacs de méthane et d'éthane.

La principale question qui se pose à propos du méthane est son origine. Cette molécule est en effet petit à petit détruite dans la haute atmosphère de Titan par le rayonnement solaire et devrait avoir totalement disparu depuis longtemps. Il y a donc des sources de méthane capables d'alimenter l'atmosphère. Les lacs ne suffisent pas, selon les modèles récents, à expliquer les quantités observées (environ 5 % de méthane près de la surface et 1,5 % dans la stratosphère). Une autre possibilité serait la présence de méthane piégé dans des cristaux de glace, appelés

clathrates. Il pourrait remonter peu à peu vers la surface ou être relâché lors d'éruptions cryovolcaniques.

Par ailleurs, la décomposition du méthane dans la haute atmosphère donne lieu à une série de réactions chimiques menant à des composés variés tels que l'éthane (C_2H_6) et d'autres hydrocarbures plus complexes. La dissociation de l'azote (N_2) et sa recombinaison avec le méthane conduisent

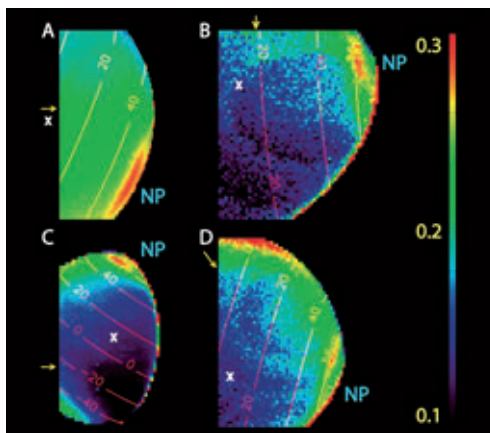


3. Le spectre du méthane simulé à différentes résolutions spectrales de plus en plus élevées, montrant la structure rotationnelle (en bleu). Dans le panneau supérieur, la courbe mauve représente un spectre calculé à basse résolution. Le panneau en bas à droite compare une petite partie du spectre calculé avec le spectre mesuré en laboratoire (en rouge).

La conséquence en est que les niveaux d'énergie de vibration se groupent en « paquets » appelés *polyades*⁽¹⁾, régulièrement espacés. Plus on monte en énergie, plus le nombre de niveaux dans chaque polyade augmente (fig. 2). Ce groupement est responsable des larges bandes d'absorption de CH₄.

Dans des environnements tels qu'une atmosphère planétaire contenant quelques pour cent de méthane et dans laquelle la lumière solaire parcourt plusieurs centaines de kilomètres, même les polyades très excitées, extrêmement faibles lorsqu'observées en laboratoire, peuvent absorber pratiquement toute la lumière aux longueurs d'onde correspondantes. La figure 2 montre ainsi une image de Saturne, prise par la sonde Cassini, sur laquelle les zones sombres correspondent à l'absorption de la lumière dans la région d'une polyade très excitée. Cette absorption de la lumière par le méthane est aussi responsable de l'opacité de l'atmosphère de Titan. Il existe cependant des fenêtres de transparence entre ces polyades. Celles-ci permettent d'observer les autres composés de cette atmosphère et constituent de plus le seul moyen de « voir » la surface de Titan depuis l'espace. Toujours sur la figure 2, une autre image prise par la sonde Cassini à travers une de ces fenêtres spectrales révèle la topographie de la surface du satellite de Saturne.

La modélisation de l'absorption de la lumière par le méthane dans de telles atmosphères nécessite donc de considérer un très grand nombre d'états excités, mais la complexité ne s'arrête pas là ! À la structure vibrationnelle du spectre se superpose sa structure rotationnelle, due au nombre encore supérieur d'états de rotation (fig. 3), rendant obligatoire l'étude à haute résolution, si l'on veut reproduire très finement le profil des bandes observées, qui dépend de la structure sous-jacente. Par ailleurs, le calcul des intensités doit être aussi précis que possible, en vue de la mesure des concentrations,

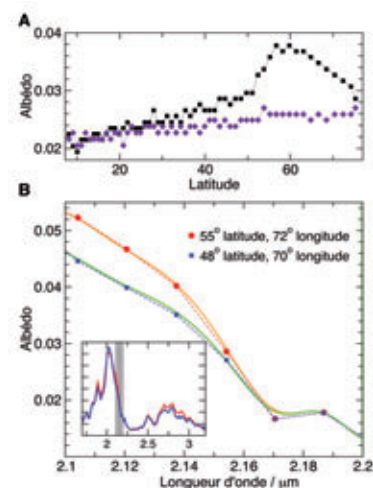


sachant que, de plus, ces intensités dépendent de la température. Réciproquement, la précision du modèle d'intensités conditionne celle de la mesure de température. Enfin, un modèle fiable apporte une bien plus grande souplesse qu'une interpolation à partir de données de laboratoire, forcément limitées.

Résultats récents

Les listes de raies calculées ont permis récemment d'apporter une contribution significative à l'analyse d'un certain nombre de mesures concernant Titan.

Ainsi, grâce à ces listes, le LESIA a pu interpréter les données du satellite ISO prises en 1997 dans la région spectrale 2,4 - 4,9 μm [1]. L'intérêt d'utiliser un domaine spectral large au lieu d'une analyse fenêtre par fenêtre dans les études antérieures, est de permettre une meilleure contrainte sur le modèle d'aérosols de Titan, et une détermination de l'abondance du méthane dans la basse atmosphère. Les mesures d'albédo de la surface de Titan, obtenues simultanément dans plusieurs fenêtres infrarouge ont permis de contraindre la composition de la surface de Titan, compatible avec la présence de glace d'eau.



4. La mesure de l'albédo de Titan révèle la présence d'un nuage d'éthane.

À gauche : cartes de l'albédo (proportion de lumière solaire réfléchie) de Titan à 2,8 μm obtenues par l'instrument VIMS de la sonde Cassini. La tache en rouge près du pôle nord (NP) est un nuage d'éthane. En haut à droite : albédo en fonction de la latitude à 2,11 μm (en noir) et à 2,17 μm (en mauve), révélant la diffusion par un nuage visible à 2,11 μm, au-delà de 51°N. En bas à droite : spectres mesurés (points) et simulés (courbes) à deux latitudes différentes. La différence entre les spectres à ces deux latitudes reflète la diffusion par le nuage d'éthane, situé vers 30 à 50 km d'altitude. Figure d'après la référence [2].

(1) Les noms des polyades viennent du Grec et correspondent au nombre de niveaux vibrationnels (sur le même principe que les noms des polygones). Ces noms sont consacrés dans la littérature sur le méthane.

►► UNE BRÈVE HISTOIRE DE SPECTROSCOPIE FONDAMENTALE...

Les outils théoriques élaborés à Dijon dès la fin des années 1970 (stimulés à l'époque par la mission Voyager) n'ont cessé de produire des modèles et des algorithmes informatiques incontournables pour l'analyse à haute résolution des spectres du méthane.

Dès les années 1980, l'équipe a été le centre de gravité de collaborations nationales et internationales impliquant à la fois des théoriciens et des expérimentateurs, notamment avec l'Université de Paris 11 Orsay, l'Institut d'Optique Atmosphérique de Tomsk (Russie) et le Jet Propulsion Laboratory à Pasadena (USA). Grâce à une intégration poussée de la théorie et du traitement numérique, l'équipe a été à l'origine du concept d'approche globale visant à une description unifiée des premières polyades d'une molécule (en positions et en intensités). Au début des années 1990, les travaux de l'équipe ont débouché sur une licence logicielle commercialisée par le CNRS. Par la suite, l'ensemble des outils développés ont été mis en ligne à disposition de la communauté scientifique. Voir le site <http://icb.u-bourgogne.fr/OMR/SMA>.

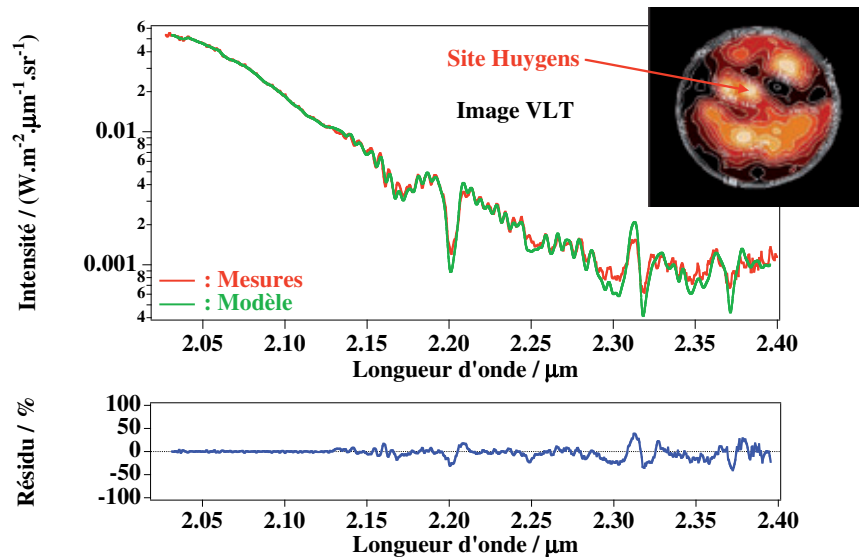
C'est donc grâce à une activité fondamentale de longue haleine, largement ouverte sur les collaborations internationales, que des réponses précises et déterminantes pour l'interprétation des données des missions spatiales ont pu être apportées.

►► UN THERMOMÈTRE HI-TECH

fabriqué en Bourgogne...

La mesure des températures des différentes couches de l'atmosphère de Titan par la sonde Cassini est basée sur l'intensité du spectre infrarouge du méthane dans la région autour de 7 μm. Cette technique s'appuie sur la modélisation réalisée à Dijon (et publiée en 1989) des paramètres des raies spectrales. Ces derniers constituent des étalons secondaires dans ce domaine.

Ce thermomètre mesure des températures entre 80 et 200 K, avec une précision de l'ordre de degré.



5. Modélisation de l'albédo de Titan.

En haut à droite : image du VLT. Les zones brillantes correspondent à des régions d'albédo élevé. En haut : spectre mesuré autour du site d'atterrissage de Huygens avec un pouvoir de résolution de 700 (en rouge) et spectre simulé (en vert). En bas, différence relative entre mesure et meilleur modèle (en bleu). Au-delà de 2,12 μm , l'erreur de mesure est de $\pm 27\%$. Le profil vertical de la brume et l'albédo de surface à 2 μm ont été déterminés à partir de ces mesures. Figure d'après [4].

Références

- 1 • A. Coustenis *et al.*, "Titan's 3-Micron Spectral Region from ISO High-Resolution Spectroscopy", *Icarus*, **180** (2006), 176-185.
- 2 • C.A. Griffith *et al.*, "Evidence for a Polar Ethane Cloud on Titan", *Science*, **313** (2006) 1620-1622.
- 3 • A. Negrão *et al.*, "Titan's Surface Albedo from Near-Infrared CFHT/FIS Spectra: Modeling Dependence on the Methane Absorption", *Planetary and Space Science*, **54** (2006) 1225-1246.
- 4 • A. Negrão *et al.*, "2- μm Spectroscopy of Huygens Probe Landing Site on Titan with VLT/NACO", *Journal of Geophysical Research*, **112** (2007) E02S92.

Pour en savoir plus

- S. Atreya, « Le Méthane, Signe de Vie sur Mars et Titan ? », *Pour la Science*, **356** (2007) 38-45.
- C. Porco, « Cassini, 1000 jours autour de Saturne », *Pour la Science*, **360** (2007) 44-51.
- *Encyclopedia of the Solar System*, édité par L.-A. Mc Fadden, P. R. Weissman et T. V. Johnson, Academic Press / Elsevier (2007).

Conclusion et perspectives : ce qu'il reste à faire

Malgré ces succès du modèle « dijonnais » pour la spectroscopie du méthane, un très gros travail reste encore à effectuer pour une interprétation globale des données planétologiques, qu'il s'agisse des mesures à relativement basse résolution spectrale par les instruments VIMS et DISR des sondes Cassini et Huygens, ou de mesures enregistrées depuis la Terre à plus haute résolution spectrale mais peu résolues spatialement. La modélisation précise raie par raie du spectre d'absorption de CH_4 n'est, pour l'instant, correcte que pour la région englobant les quatre premières polyades (fig. 2). Une meilleure modélisation du spectre du méthane à courte longueur d'onde permettrait de cartographier avec précision le profil vertical de la brume et son évolution saisonnière, ainsi que l'albédo de surface. La détermination de l'albédo dans différentes fenêtres spectrales fournirait des contraintes essentielles sur les divers composés présents à la surface (glace d'eau, hydrocarbures liquides, dépôts photochimiques...), et leur répartition sur le satellite.

Deux défis majeurs se présentent maintenant. Le premier concerne l'étude des polyades plus élevées (pour l'interprétation des données de la sonde Huygens, par exemple). Le nombre de niveaux quantiques en jeu dans ces polyades devient gigantesque et de nouvelles approches théoriques vont devoir être envisagées. La contribution de la chimie quantique, qui a réalisé d'énormes progrès ces dernières années, devrait se révéler essentielle.

Le second défi concerne la modélisation la plus précise possible des profils spectraux. En effet, dans une atmosphère comme celle de Titan, le spectre d'absorption du méthane est influencé par les autres molécules présentes (*via* des collisions), et en premier lieu l'azote, pour lequel peu d'études existent. Ceci est une source d'incertitude dans les modélisations actuelles de spectres planétaires (fig. 5), ce qui affecte les valeurs des paramètres physiques obtenus.

Il serait aussi possible d'analyser avec une bien meilleure précision les signatures spectrales de composés mineurs (monoxyde de carbone, éthane...) qui se superposent à celles du méthane, et ainsi de cartographier leurs abondances. Les signatures de molécules non encore détectées pourraient également être recherchées. À terme, ce type d'étude se révélera indispensable, non seulement pour l'interprétation des spectres planétaires et stellaires, mais aussi pour l'atmosphère terrestre, dans laquelle le méthane est un gaz à effet de serre très important. La modélisation du spectre du méthane est un sujet interdisciplinaire, qui est amené à fédérer de nombreuses compétences et thématiques. ■

Une autre contribution importante a été la participation à la mise en évidence, par une équipe de l'Université d'Arizona (USA), d'un vaste nuage d'éthane polaire sur Titan. Ceci a été possible grâce à la simulation du spectre du méthane dans la région dite de l'octade (fig. 2), autour de 2,1 à 2,2 μm . Comme illustré sur la figure 4, il a été montré que la différence entre le spectre dans et en dehors du nuage en question était due à la diffusion par des petites particules situées vers 30 à 50 km d'altitude, avec des caractéristiques indiquant que ce nuage est vraisemblablement composé d'éthane. L'éthane (C_2H_6), principal produit de la photodissociation du méthane par le rayonnement solaire dans la haute atmosphère de Titan, devrait précipiter au sol. L'apparente absence d'éthane liquide à la surface aux latitudes moyennes de Titan était donc jusqu'à présent un mystère. Ces nouvelles observations suggèrent qu'en fait l'éthane semble condenser plutôt dans ce type de nuages polaires, et s'accumuler très probablement dans les lacs présents dans ces régions. Ce résultat important a été publié dans la revue *Science* [2].

Les coefficients d'absorption du méthane calculés dans l'infrarouge moyen permettent une modélisation correcte de l'absorption atmosphérique de Titan mesurée par le télescope CFHT [3], à partir de laquelle les variations d'albédo de surface peuvent être déduites.

Enfin, des spectres ont été enregistrés entre 2,03 et 2,40 μm à l'aide d'un des télescopes du VLT pour différentes régions de Titan, dont le site d'atterrissage de la sonde Huygens, comme on peut le voir sur la figure 5 [4]. Les coefficients d'absorption du méthane calculés dans l'infrarouge moyen permettent, en utilisant le profil d'abondance du méthane mesuré par la sonde Huygens, une modélisation correcte de l'absorption atmosphérique de Titan, à partir de laquelle l'albédo de surface peut être déduit dans un domaine spectral non couvert par l'instrument DISR.

Histoire des sciences

Frédéric Joliot-Curie

et la première pile atomique française

Pierre Radvanyi (radva@ipno.in2p3.fr)
Institut de physique nucléaire, Université Paris-Sud, 91406 Orsay Cedex

Frédéric Joliot est décédé il y a 50 ans. Avec Irène Joliot-Curie, il avait découvert en 1934 la radioactivité artificielle. En 1939-1940, aussitôt après la découverte de la fission de l'uranium, il étudie, avec Halban et Kowarski, la possibilité puis les conditions de réalisation d'une réaction en chaîne. Des brevets sont pris et des contacts établis avec l'industrie ; un commando en Norvège permet d'obtenir l'eau lourde. L'invasion de la France interrompt les efforts. Ils seront repris après-guerre avec la création du CEA et la mise en route en 1948 de ZOÉ, première pile atomique française.



Irène et Frédéric Joliot-Curie en 1932, dans leur laboratoire de physique à l'Institut du Radium.

L'année 2008 marque le cinquantième anniversaire de la mort de Frédéric Joliot (1900-1958), ainsi que le soixantième anniversaire de la mise en route, sous sa direction, du premier réacteur nucléaire français, ZOÉ.

Frédéric Joliot est né à Paris le 19 mars 1900. Sorti major de l'École municipale de physique et chimie industrielles, il est présenté par le directeur des études, Paul Langevin, à Marie Curie, qui le recrute aussitôt comme préparateur particulier dans son laboratoire de l'Institut du Radium. Irène Curie, fille de Marie et de Pierre, est chargée de le piloter. Les deux jeunes gens se marieront en 1926 et entreprendront une série d'expériences en commun dans le domaine de la radioactivité.

Découverte de la radioactivité artificielle

En 1930, à Berlin, W. Bothe et H. Becker constatent que le bombardement du béryllium par des particules alpha produit un rayonnement très pénétrant non identifié. Frédéric et Irène réalisent de petites sources très intenses de polonium, émetteur alpha. Au début de 1932, ils observent que le rayonnement pénétrant est capable de projeter des protons de recul hors de feuilles de substances hydrogénées. Ce sera le point

de départ de James Chadwick qui, un mois plus tard, à Cambridge, découvre que le rayonnement inconnu est constitué de « neutrons ».

Poursuivant leurs expériences, Frédéric et Irène découvrent, en janvier 1934, la « radioactivité artificielle », c'est-à-dire l'existence d'isotopes radioactifs d'éléments stables formés par des réactions nucléaires dans d'autres éléments (par exemple du phosphore radioactif dans l'aluminium). C'est une généralisation remarquable de la radioactivité naturelle avec de multiples applications, en particulier en biologie. Cette découverte vaudra aux deux jeunes chercheurs le prix Nobel de chimie de 1935. Au retour de Stockholm, lors d'un banquet en l'honneur des nouveaux lauréats, Paul Langevin propose de les appeler dorénavant les « Joliot-Curie ».

Aussitôt, à Rome, Enrico Fermi et son équipe se mettent en devoir de produire des isotopes radioactifs de tous les éléments chimiques en utilisant des neutrons, capables de pénétrer dans les noyaux les plus lourds. Ils observent dans l'uranium irradié par des neutrons ce qu'ils pensent être des « transuraniens », des noyaux plus lourds que l'uranium. Le flambeau est repris à Berlin par Otto Hahn, Lise Meitner et

Dispositif de production d'énergie.

CAISSE NATIONALE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE résidant en France (Seine).

Demandé le 1^{er} mai 1939, à 16^h 55^m, à Paris.

Délivré le 1^{er} novembre 1950. — Publié le 19 mars 1951.

(Brevet d'invention dont la délivrance a été ajournée en exécution de l'article 11, § 7, de la loi du 5 juillet 1844 modifiée par la loi du 7 avril 1902:)

On sait que l'absorption d'un neutron par un noyau d'uranium peut provoquer la rupture de ce dernier avec dégagement d'énergie et émission de nouveaux neutrons en nombre en moyenne supérieur à l'unité. Parmi les neutrons ainsi émis, un certain nombre peuvent à leur tour provoquer sur des noyaux d'uranium — de nouvelles ruptures, et les ruptures de noyaux d'uranium pourront ainsi aller en croissant suivant un progrès géométrique, avec dégagement de quantités extrêmement considérables d'énergie.

On s'est rendu compte, conformément à la présente invention, que si l'on parvenait à provoquer une telle réaction au sein d'une masse limitée d'uranium (ou de composé d'uranium ou d'un mélange contenant de l'uranium), on pourrait extraire de cette masse et utiliser à des fins industrielles l'énergie ainsi développée par les chaînes de ruptures successives.

Mais on se heurte immédiatement à une difficulté primordiale : ces chaînes pouvant se ramifier d'une manière illimitée, la réaction peut devenir explosive, ce qui restreindrait considérablement les possibilités d'utilisation de la masse d'uranium en question comme source maniable d'énergie industrielle.

On a donc cherché à maîtriser le dégagement d'énergie en l'empêchant de devenir explosif, et l'on a eu l'idée à cet effet :

1° Tout d'abord de réduire la vitesse de tout ou partie des neutrons libérés, de telle sorte qu'ils ne puissent être ainsi perdus pour le processus en chaîne.

répartitions des constituants du dispositif, arrêtant ainsi le développement des chaînes;

2° Ensuite, d'introduire dans le dispositif un ou plusieurs éléments — à l'état de corps simples ou de combinaisons chimiques — susceptibles d'absorber les neutrons ralentis en proportion d'autant plus forte par rapport à l'absorption par l'uranium que la température est plus élevée.

Par le premier de ces moyens ou l'emploi conjugué de ces deux moyens, les chaînes peuvent se développer jusqu'à ce qu'une énergie suffisamment importante soit libérée, et être alors automatiquement interrompues ou limitées, évitant ainsi le développement explosif de la réaction.

On arrive ainsi à libérer de la masse d'uranium considérée, en vue de son utilisation industrielle, et au fur et à mesure des besoins, l'énergie qu'elle est susceptible de fournir par transmutations.

Pour réduire la vitesse de tout ou partie des neutrons émis, on introduit au sein de la masse d'uranium — et suivant une répartition qui n'est pas nécessairement uniforme — des éléments très légers tels que l'hydrogène, le deutérium par exemple, libres ou combinés, ou des éléments légers tels que le glucinium, le carbone, l'oxygène par exemple, libres ou combinés.

Un avantage spécial des ralentisseurs très légers est de diminuer la proportion des neutrons qui sont absorbés par résonance dans l'uranium et qui peuvent être ainsi perdus pour le processus en chaîne.

Première page du brevet déposé le 1^{er} mai 1939.

au nom de la Caisse nationale de la recherche scientifique (ancêtre du CNRS). Aussitôt après, F. Joliot se rend à Bruxelles pour proposer une collaboration industrielle à l'Union minière du Haut-Katanga. Un accord est signé et un projet de convention est préparé. L'Union minière met un total de 8 tonnes d'oxyde d'uranium à la disposition de l'équipe, qui poursuit ses travaux au laboratoire de synthèse atomique à Ivry. En quelques semaines, F. Joliot est passé de la recherche fondamentale à la recherche appliquée. Aux États-Unis, N. Bohr et J.A. Wheeler montrent que l'uranium 235, isotope peu abondant de l'uranium, est responsable de la fission par neutrons lents.

La guerre éclate le 1^{er} septembre 1939. Les travaux se poursuivent, mais leurs résultats ne sont plus publiés ; un pli cacheté est déposé à l'Académie des sciences. Frédéric Joliot est reçu par Raoul Dautry, le nouveau ministre de l'Armement, et lui explique les objectifs des travaux en cours. Les neutrons lents sont plus efficaces pour provoquer des fissions ; l'équipe utilise un milieu hydrogéné (modérateur) pour ralentir les neutrons. Elle se rend compte cependant que, pour obtenir une réaction en chaîne divergente, modérateur et uranium doivent être séparés pour former un dispositif hétérogène. Les physiciens constatent que l'hydrogène ordinaire absorbe trop les neutrons et ils souhaitent alors utiliser du deutérium comme modérateur. Il leur faut donc obtenir de l'eau lourde qui n'est préparée à l'époque qu'à Rjukan en Norvège. S'appuyant sur un rapport de Joliot, Dautry décide d'envoyer en mission secrète en Norvège le lieutenant Jacques Allier, à la tête d'un commando, pour obtenir ce précieux produit. L'opération se déroule avec succès au début de mars 1940, permettant de ramener en France 167 litres d'eau lourde.



Joliot (à gauche), Halban (au centre) et Kowarski (à droite), ajustant un amplificateur d'impulsions au laboratoire de chimie nucléaire du Collège de France.

Fritz Strassmann ; dans leurs publications, ces derniers indiquent alors avoir identifié plusieurs séries de transuraniens. Dans les premiers mois de 1938, à Paris, Irène Joliot-Curie et Paul Savitch ouvrent une nouvelle voie d'étude du problème.

Fission, réaction en chaîne et contexte international

En juillet 1938, à la suite de l'Anschluss, Lise Meitner, physicienne autrichienne d'origine juive, doit fuir l'Allemagne et se réfugier en Suède. Hahn et Strassmann reprennent leurs séparations chimiques pour examiner avec plus de rigueur encore si certains transuraniens ne seraient pas en fait des isotopes du radium. Peu avant Noël 1938, à leur grande surprise, ils découvrent que ces radioéléments ne sont pas des isotopes du radium, mais du baryum, élément beaucoup plus léger ; des noyaux d'uranium auraient donc « éclaté » sous l'action des neutrons. Leurs résultats seront publiés début janvier 1939. Alertée par Otto Hahn, Lise Meitner, avec son neveu Otto Frisch, donne une explication physique du phénomène, auquel ce dernier donnera le nom de « fission ».

Professeur au Collège de France, Joliot se saisit aussitôt du problème. Il se rend compte, comme plusieurs de ses collègues à travers le monde, que la fission doit libérer une énergie considérable. Cette constatation le conduit immédiatement à une expérience sur les noyaux de recul, apportant une preuve physique de la fission. Un cliché de chambre à brouillard lui apporte une confirmation supplémentaire. Il pense que la fission doit être accompagnée de l'émission de nouveaux neutrons, ce qui rendrait possible une réaction en chaîne. Il forme alors une équipe avec Hans Halban et Lew Kowarski pour vérifier par l'expérience que de nouveaux neutrons sont effectivement émis, pour mesurer ensuite leur énergie et déterminer leur nombre. Les résultats obtenus sont très encourageants.

L'équipe du Collège de France est en compétition avec une équipe de l'université Columbia de New York, conduite par Fermi, à laquelle se joint Leo Szilard. L'équipe française est en général en avance d'une à trois semaines ; elle demande à Francis Perrin de se joindre à elle pour calculer les dimensions d'un dispositif producteur d'énergie. Les 1^{er}, 2 et 4 mai 1939, elle dépose trois demandes de brevets

Deux nouveaux brevets sont pris les 30 avril et 1^{er} mai 1940. Mais, peu après, commence l'invasion allemande. Halban, Kowarski, l'eau lourde et une grande partie des appareils sont repliés à Clermont-Ferrand, que F. Joliot rejoint juste avant l'entrée de la Wehrmacht à Paris. La situation est devenue dramatique. Les trois physiciens emmènent l'eau lourde à Bordeaux. À la demande de Joliot, Halban et Kowarski, munis d'un ordre de mission, embarquent le 17 juin pour l'Angleterre à bord du "Broompark", emportant le stock d'eau lourde et les documents correspondant aux derniers résultats obtenus. F. Joliot décide de rester en France. L'uranium, transporté au Maroc, est caché dans une galerie de mine désaffectée pendant toute la guerre. Parvenus à Londres, Halban et Kowarski rédigent le résumé et les conclusions des derniers travaux de l'équipe ; ils terminent par les phrases suivantes : « Deux voies sont préconisées pour la production d'énergie : la méthode des neutrons lents avec un petit enrichissement en uranium 235 ; ou l'espoir que la capture de neutrons par l'uranium 238 conduise en fin de compte à un nouveau noyau fissile⁽¹⁾. »

Frédéric Joliot, revenu à Paris, fait face. Il trouve son laboratoire du Collège occupé par les Allemands, mais placé sous l'autorité d'un physicien ami, Wolfgang Gentner, un « ancien » de l'Institut du Radium. Celui-ci le protégera efficacement, alors que Joliot s'engage activement dans la Résistance. Le physicien français entreprend des recherches en collaboration avec des biologistes sur l'utilisation des radioéléments en biologie.

(1) Ce sera en effet le plutonium 239, découvert à Berkeley en 1940/1941.

(2) L'espace ZOÉ du CEA/Fontenay-aux-Roses peut se visiter sur rendez-vous. Contact : 01 46 54 96 00 ou 01 46 54 70 80.

Après la Libération : le CEA et ZOÉ

À la Libération, en août 1944, Joliot est nommé directeur général du CNRS. Il apprend peu à peu ce qui a été réalisé aux États-Unis pendant la guerre, et notamment la mise en route de la première pile atomique (réacteur nucléaire) à Chicago, sous la direction de Fermi, en décembre 1942. Joliot a deux entretiens avec le général de Gaulle, président du gouvernement provisoire, en novembre 1944 et, en compagnie de Pierre Auger, en mai 1945. L'idée d'un organisme français spécialement consacré à l'énergie atomique (énergie nucléaire) se fait jour. Après les bombes atomiques sur Hiroshima et Nagasaki en août 1945, de Gaulle fait adopter, en octobre 1945, l'ordonnance créant le Commissariat à l'énergie atomique ; le texte en a été préparé par F. Joliot et R. Dautry. Le 3 janvier 1946, de Gaulle nomme Frédéric Joliot haut commissaire et Raoul Dautry administrateur général.

F. Joliot lance immédiatement la prospection minière d'uranium en France. Il devait décrire ainsi, trois ans plus tard, en février 1949, le programme du nouvel organisme : « Nous partions presque de zéro au point de vue matériel et il fallait tout créer, mais l'ordonnance spéciale qui installait le Commissariat avait été prise en vue de faciliter notre tâche. Nous avons aussitôt prévu trois étapes dans le développement de l'énergie atomique et la première de celles-ci comprenait la construction d'une pile à uranium et eau lourde, de faible puissance, avec tout ce que cela comportait de constructions annexes. »

Sous l'impulsion enthousiaste du savant et sous la conduite de Lew Kowarski de retour du Canada, se construit ainsi au fort de Châtillon à Fontenay-aux-Roses la pile ZOÉ (pour puissance Zéro, Oxyde d'uranium

et Eau lourde). Le CEA dispose pour cela des résultats obtenus par l'équipe du Collège de France en 1939-1940, de l'uranium rapporté du Maroc, des accords passés avec la Norvège pour l'eau lourde, des connaissances apportées par les Français revenus du Canada (Kowarski, Goldschmidt, Guéron et Auger) et des éléments du rapport Smyth rendu public par les Américains dès août 1945 (*Review of Modern Physics*, octobre 1945). Les travaux avancent rapidement. L'uranium est traité à l'usine du Bouchet, au sud de Paris. Le 15 décembre 1948, ZOÉ, la première pile atomique française, entre en fonctionnement. Elle allait fournir des radioéléments artificiels pour les applications biologiques, permettre de former les techniciens et d'élaborer les matériaux nécessaires à la construction des piles de moyenne puissance. Son installation extérieure a été conservée et on peut la visiter⁽²⁾. ■

Bibliographie

- Frédéric Joliot, *Atomes*, N° 35, février 1949 et *Œuvres scientifiques complètes*, P.U.F., 1961, p. 822.
- Michel Pinault, *Frédéric Joliot-Curie*, Éd. Odile Jacob, 2000.
- Pierre Radvanyi, *Les Curie, pionniers de l'atome*, Éd. Belin, 2005.
- Spencer R. Weart, *La grande aventure des atomistes français*, Éd. Fayard, 1980.

EXPOSITION

« Frédéric Joliot-Curie (1900 - 1958) »

une exposition réalisée par le Musée Curie, à Paris, Mairie du 5^e arrondissement, du 17 octobre au 6 novembre 2008.
Renseignements : 01 56 81 75 05



F. Joliot (en imperméable) et L. Kowarski (à droite) devant les casemates du Fort de Châtillon en 1946.



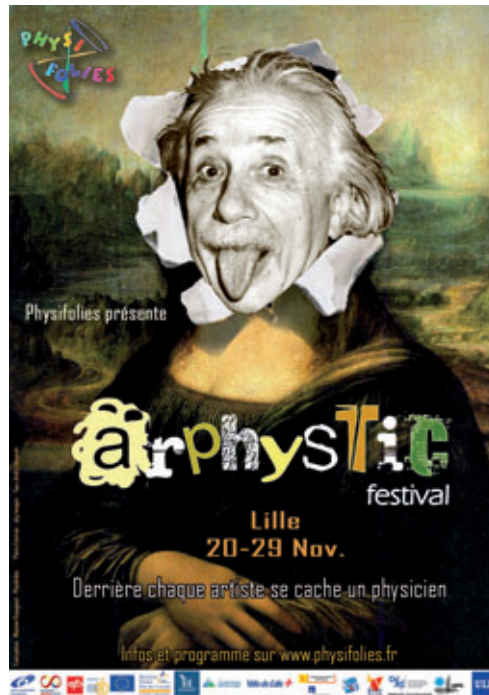
Frédéric Joliot (à gauche) et Lew Kowarski (à droite) accompagnant le président de la République, Vincent Auriol (au centre), lors de l'inauguration de ZOÉ en décembre 1948.

Le festival Arphystic

Daniel Hennequin (daniel.hennequin@physifolies.fr)

Laboratoire PhLAM, Bat. P5 - Université de Lille 1, 59655 Villeneuve-d'Ascq Cedex

Derrière chaque artiste se cache un physicien. C'est ce que proclamait l'affiche d'Arphystic, un festival de physique qui se tenait dans la métropole lilloise en novembre 2007. Organisé par Physifolies, une action de la section locale de la SFP, il s'articulait autour d'une exposition montée sous un immense chapiteau dans le Vieux-Lille. L'événement fut un énorme succès. Ce fut aussi pour les membres de la section locale une expérience extrêmement enrichissante, l'occasion de découvrir l'univers de l'événementiel et d'y appliquer le résultat de leurs réflexions sur la valorisation de notre discipline.



Affiche de l'exposition

Du 22 au 25 novembre 2007, l'immense chapiteau de 600 m² dressé dans le Vieux-Lille ne passe pas inaperçu ! Près de l'entrée, deux gigantesques écrans diffusent des images où se mêlent futurisme et onirisme. Juste à côté, une toile géante proclame « Arphystic festival ». La presse locale titre « Ce week-end, emmenez absolument vos enfants au festival Arphystic ! ». Dans un des petits restaurants près du chapiteau, le chef crée un dessert « Arphystic ». Et dans le chapiteau, c'est près de 5000 personnes qui se pressent pendant 4 jours. Mais qu'est-ce donc

que ce festival *Arphystic* qui attire les foules en cette fin d'automne ? Un festival de musique ? De cinéma peut-être ? Ou de théâtre ? Eh non ! C'est un festival de physique !

Comme son nom l'indique, le festival est un ensemble d'événements qui s'étalent sur une période restreinte (deux semaines dans notre cas) sur un thème précis, traité du point de vue de la physique. En 2007, nous avons choisi de décliner « Physique et Art » au fil de conférences, bars des sciences, pièces de théâtre, spectacles de danse et surtout, point d'orgue du festival, l'exposition du Vieux-Lille.

Dialoguer avec le grand public

En 2004-2005, pour l'Année Mondiale de la Physique, la section locale de la SFP crée l'association Physifolies dans le but de regrouper autour d'un projet commun tous les acteurs de la physique dans le Nord-Pas de Calais : enseignants du secondaire et du supérieur, chercheurs, étudiants, associations... L'Année est un succès : nous drainons 30 000 visiteurs sur environ 120 événements.

Parmi ces événements, les quatre expositions organisées à la Maison Folie Wazemmes¹ accueillent à elles seules 12% du public. Les « Physifolies² » regroupent des expériences de physique interactives et ludiques. Chaque stand est animé par un physicien – étudiant, technicien, ingénieur, chercheur ou enseignant – et c'est donc le dialogue entre le physicien et le public qui est privilégié. De plus, située dans un quartier populaire de Lille, la Maison Folie Wazemmes nous permet de toucher un public qui ne



1. La façade du chapiteau – 2. L'entrée du chapiteau et l'espace « hologrammes » – 3. Le chapiteau ne désemplit pas... – 6. Le mime, face à la chambre noire, ne manque pas d'attirer l'attention. Sa projection dans la chambre noire est... renversante !

fréquente pas en général les lieux de science. La plupart des visiteurs entrent par hasard, mais restent typiquement deux heures dans l'exposition : l'intérêt soulevé est manifeste.

Fin 2005, nous décidons d'organiser tous les deux ans un festival de Physique centré sur une telle exposition. Après avoir trouvé un financement, qui est venu essentiellement de l'Europe³, il nous restait à définir le thème : Physique et Art a été retenu pour son côté porteur et parce que nous avons déjà un peu d'expérience dans ce domaine.

Attirer le public

L'objectif du festival est de faire découvrir la physique à ceux qui ne la connaissent pas. Nous voulons capter un public qui ne se rendra pas spontanément à une manifestation scientifique. Il nous faut donc investir un lieu de passage important, et attiser suffisamment la curiosité du passant pour qu'il fasse les quelques pas qui le séparent de l'exposition.

Un nom et une affiche

On peut douter de l'utilité d'annoncer un tel événement au grand public : dans une métropole comme Lille, l'annonce d'un festival de physique va passer inaperçue au milieu des dizaines d'événements organisés chaque week-end. Il nous faut donc un nom accrocheur – ce sera « Arphystic » – et un visuel qui se remarque – le portrait d'Einstein le plus célèbre, sur fond de Joconde, a bien rempli son rôle. Pour le reste, rien d'extraordinaire : dossier de presse envoyé à tous les médias et pleine page de publicité dans des quotidiens gratuits.

Un lieu central et une scénographie recherchée

Le choix du lieu est primordial. Malgré un surcoût important, nous optons pour un chapiteau dans le Vieux-Lille. Dans ce quartier historique et commerçant, le montage du chapiteau de 600 m² ne passe pas inaperçu (c'est une première !). En insérant dans la façade du chapiteau deux écrans géants diffusant en permanence des films de science choisis pour leur valeur esthétique, nous ne pouvons pas manquer d'attirer les foules.

Garder le public

Piquer la curiosité du promeneur est une chose, le retenir suffisamment longtemps pour lui montrer notre passion de la physique et lui donner envie de revenir en famille quelques heures plus tard en est une autre. Ses premiers pas dans l'exposition doivent lui donner envie de voir le reste. Et bien sûr, les sujets abordés doivent être passionnants, et suffisamment variés pour toucher tous les âges et toutes les cultures.

Une scénographie accueillante

Un chapiteau est initialement un peu froid, et le rendre accueillant est notre premier souci. Nous cloisonnons partiellement l'intérieur du chapiteau, afin de casser l'aspect « foire » tout en conservant une impression d'espace. Le cloisonnement permet aussi de guider le visiteur sur un circuit sans jamais l'imposer. Des éclairages de couleurs différentes, tout en rendant le chapiteau plus chaleureux, contribuent aussi à délimiter des zones en jouant sur un code couleur.

Le visiteur entre d'abord dans une zone sombre et fermée abritant une exposition

itinérante du Musée de l'Holographie⁴ : une trentaine d'hologrammes, un diaporama pédagogique, et un physicien pour ceux qui voudraient en savoir plus. Pour sortir de cet espace, le visiteur écarte un rideau et arrive dans la zone d'exposition proprement dite. Face à lui, l'écran géant qui diffuse les mêmes films qu'à l'extérieur attire irrésistiblement son regard. Puis la découverte peut réellement commencer.

Physique et art côté artistes

Certains stands privilégient le côté artistique. C'est le cas du stand « Alliages à mémoire de forme », construit autour de deux sculptures monumentales d'Étienne Krahenbuhl⁵. Étienne est un sculpteur suisse travaillant le métal. Il doit sa maîtrise des alliages à mémoire de forme à sa rencontre avec Rolf Gotthardt, un physicien de l'EPFL (Lausanne). Étienne met à profit l'hyperélasticité de ces alliages pour créer des sculptures dynamiques à taux de relaxation extrêmement lent⁶. Au-delà de la dimension visuelle, les éléments métalliques qui s'entrechoquent génèrent de longues mélodies aux sonorités harmonieuses. Ces œuvres attirent inmanquablement petits et grands. Des animateurs sont là pour répondre à leur envie de comprendre, et en profitent pour montrer les autres propriétés étranges de ces alliages.

Physique et art côté enfants

Les enfants aussi s'amuse à *Arphystic* ! Par exemple, avec des spaghettis, en essayant de construire un pont suffisamment solide pour faire passer une boule de pétanque. Ou encore, en participant à un concours de dessins un peu particulier... puisqu'il faut d'abord fabriquer les gouaches à partir de pigments !



4. Autour d'une sculpture d'Etienne Krahenbuhl, une étudiante-animatrice explique à des enfants les propriétés des alliages à mémoire de forme – 5. Les adultes aussi s'amuse...



Pas besoin de matériel sophistiqué pour faire découvrir l'analyse spectrale ! Une toile, un crayon au graphite, de la gouache et un peu de vernis achetés au magasin de loisirs du coin, un caméscope et une lampe UV à 4 €... et le tour est joué.

(1) La Maison Folie Wazemmes est une des nombreuses maisons culturelles créées en 2004, dans le cadre de « Lille, capitale européenne de la culture ».

(2) « Physifolies » était à l'origine le nom des expositions que nous avons organisées à la Maison Folie Wazemmes. Depuis 2006, nous utilisons ce nom pour toutes nos manifestations.

(3) Projet MEYPS SC2 : <http://meyps.univ-lille1.fr/>

(4) Musée de l'Holographie, Paris : <http://museeholographie.com/>

(5) Voir www.ekl.ch/

(6) Excuse-moi, Étienne, de décrire les extraordinaires mouvements de tes œuvres par des termes aussi triviaux !

Accessible aux enfants mais destiné à tous les publics, un quiz multimédia interactif tourné pour l'occasion reprend tous les thèmes abordés dans l'exposition. Constitué de petits sketches filmés donnant prétexte à une question, il permet de « réviser » tout en s'amusant...

Physique et art côté physique

Qu'est-ce que le son ? Comment fonctionne un instrument de musique ? Quels sont les différents procédés de capture de l'image ? Comment peut-on analyser une œuvre d'art ? Qu'est-ce que la datation au carbone 14 ? Comment fonctionne un appareil photo ? Comment fonctionnera la télévision en relief ? Qu'est-ce que la lévitation ? Autant de stands abordant la physique de l'Art.

Prenons, par exemple, l'analyse des œuvres d'art. Pas besoin de matériel sophistiqué pour faire découvrir l'analyse spectrale au grand public ! Une toile, un crayon au graphite, de la gouache et un peu de vernis achetés au magasin de loisirs du coin, et le tour est joué. Le plus dur est de trouver quelqu'un capable de nous faire un dessin au graphite acceptable, puis de le recouvrir d'une peinture à la gouache tout aussi acceptable. Vernir partiellement le tableau n'est pas un problème... Le caméscope de l'association, en position *nightshot*, nous permet de voir dans l'infrarouge (et donc de voir le dessin derrière la peinture). Et une lampe UV à 4 €, destinée initialement à détecter les faux billets, révèle les zones vernies. Le public est ravi...

Autre exemple : comment fonctionne un appareil photo ? Il faut bien sûr remonter à la source, c'est-à-dire la chambre noire. Et expliquer la propagation de la lumière à travers une petite ouverture et l'inversion de l'image sur l'écran. Le plus simple est de le montrer. Donc, nous avons construit une chambre noire pouvant contenir les visiteurs, et placé devant l'ouverture un mime bien éclairé qui, en plus, mettait de l'animation sous le chapiteau. Résultat : une queue sans fin à l'entrée de la chambre noire.

Des étudiants enthousiastes

Derrière chaque stand, un physicien, le plus souvent un étudiant de fin de licence ou en master (30 étudiants se sont relayés pendant les 4 jours). C'est, bien sûr, leur enthousiasme communicatif qui fait le succès de cette exposition : les visiteurs découvrent une physique passionnante et des jeunes physiciens passionnants et passionnés. Ils passent en général plus d'une heure et demie sous le chapiteau et, à la sortie, en redemandent...

De la danse et du théâtre

Si l'exposition est l'événement phare du festival, elle n'est pas le seul : en plus des traditionnels bars des sciences et autres conférences, le festival propose des événements artistiques à connotation physique plus ou moins appuyée. Citons par exemple la chorégraphie « Erase-E(x) » illustrant les tâtonnements réfléchis du scientifique, ou « Valentina bien au-dessus des nuages », qui évoque l'histoire de la première femme spatonaute.

Une expérience réussie

Avec près de 5000 visiteurs, dont 800 scolaires, uniquement pour l'exposition, cette première édition du festival *Arphystic* a largement dépassé nos objectifs les plus optimistes et place d'emblée ce festival de physique parmi les plus gros événements culturels de la métropole lilloise. Les nombreux articles parus dans la presse écrite régionale et transfrontalière, ainsi que les deux reportages télévisés diffusés sur France 3 et une chaîne locale, ont encore accru notre impact.

Arphystic est donc un succès, et nous avons d'ores et déjà programmé la seconde édition du festival en novembre 2009. Le thème retenu cette fois, Année Mondiale de l'Astronomie oblige, est Physique et Astronomie, et le projet a déjà été labellisé AMA09. Rendez-vous donc en 2009, pour « rêver et comprendre l'Univers ». ■

►► PHYSIFOLIES, LA PHYSIQUE AUTREMENT

Plus d'informations sur www.physifolies.fr

« Physifolies » est une action de la section locale Nord-Pas de Calais – Picardie de la SFP. Elle est animée par un bureau de 8 personnes. Chacun s'investit sur tous les aspects de l'organisation du festival, souvent bien au-delà de sa mission initiale :

Maxime Beaugeois (communication), Patrice Cacciani (communication), Bruno Capoen (conférences et bars des sciences), Jean Cosléou (expositions), Marie-Christine Groslière (événements artistiques), Daniel Hennequin (expositions et site *web*), Georges Wlodarczak (événements artistiques) et notre présidente Nathalie Lebrun (recherche des budgets).

Les partenaires suivants ont également participé à l'élaboration des stands de l'exposition *Arphystic* : l'UFR de Physique de l'université de Lille 1, le laboratoire PhLAM (UMR 8523), la cellule vidéo du service multimédia de l'université de Lille 1 (SEMM), le Forum départemental des Sciences, InforSciences (Université Libre de Bruxelles), le musée de l'Holographie (Paris), Michel Chatry (mairie de Wattrelos), Thierry Teyssou (société BelnRelief), Bernard Conil et Marcel Rogge (lycée Don Bosco de Tournai, Belgique), Olivier Boisard (réalisateur), Étienne Krahenbuhl (sculpteur).

Des partenaires financiers nous aident depuis le début de l'aventure : l'Union Européenne, le Conseil Régional Nord-Pas de Calais, les Conseils Généraux du Nord et du Pas-de-Calais, la Ville de Lille.

La SFP au 4^e Salon Européen de la Recherche et de l'Innovation

La SFP a participé à la 4^e édition du Salon Européen de la Recherche et de l'Innovation (SERI), qui s'est tenue du 5 au 7 juin 2008 à Paris-Expo, Porte de Versailles.

Pendant 3 jours, plus de 25 000 visiteurs sont venus découvrir les tendances et innovations technologiques de 360 exposants (institutions, industriels, régions, pays, enseignement supérieur, organismes d'aide à la création...), et assister à 103 conférences. 15 pays étaient représentés. Cette année, l'invité d'honneur était la Finlande.

Les stands des sociétés savantes, SMF/SFP/SFC d'une part, SEE d'autre part, étaient réunis sur un même espace. Sur le stand SMF/SFP/SFC, Nicole Leray (SFC) a fait de la relecture de CV d'étudiants.

Pendant le salon, ont eu lieu les remises du prix Félix Robin 2007, décerné par la SFP (à Jean-Eudes Augustin, voir notice dans *Reflets* n°9, p. 26) et du Grand Prix de Physique et Applications Louis Néel 2008, décerné par le G2P (à Mathias Fink, notice à paraître dans *Reflets* n°12). Les exposés brillants des deux candidats ont attiré un large public.



Relecture de CV au stand commun des sociétés françaises de mathématiques (SMF), physique (SFP) et chimie (SFC).



Le public dans l'agora, pendant l'exposé de Mathias Fink : « Renversement du temps. Ondes et innovations ».

Conseil du 20 juin 2008

Les principaux points à l'ordre du jour concernaient l'ouverture d'un forum, les évolutions prévues de *Reflets de la physique*, les prix SFP et l'action Nord-Sud.

En début de séance, Michèle Leduc rappelle que la SFP, fréquemment sollicitée par les instances ministérielles, a proposé de mettre en place un forum de discussion, afin que les adhérents puissent échanger leurs points de vue sur les problèmes actuels liés à l'évolution de l'enseignement supérieur et de la recherche en France. Ce forum (modéré par R. Maynard) sera accessible prochainement à la rubrique « débat » du site de la SFP.

Charles de Novion présente le projet de création d'un site *web* indépendant dédié à *Reflets de la physique*, qui sera relié à celui de la SFP et géré par EDP Sciences. Le site et la revue contiendront de la publicité en quantité limitée. Le Conseil émet le souhait que l'accès au contenu du futur site de *Reflets* soit partiellement restreint aux membres de la SFP.

Le Conseil d'administration a attribué les prix suivants :

| | |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Prix Jean Ricard 2008 | Philippe Grangier |
| Prix Félix Robin 2008 | Rémi Jullien |
| Prix Aimé Cotton 2008 | Jérôme Kasparian |
| Prix Yves Rocard 2008 | Jérôme Primot, Jean-Christophe Canteloup, Benoît Wattelier, Nicolas Guérineau et Sabrina Velghe. |

Il approuve les trois nominations du jury qui seront transmises à l'Institute of Physics pour le prix Holweck 2009. Yves Petroff attire l'attention du Conseil sur le fait que sur les grands prix distribués par la SFP ces dernières années, seule une petite fraction a été attribuée à des provinciaux ! Ceci donne l'impression que la SFP est un petit club parisien. De plus, les candidatures pour ces grands prix proviennent essentiellement de Paris et de quelques grands centres. M. Leduc et Y. Petroff proposent donc d'envoyer en janvier, avant l'Assemblée générale, un courriel à tous les membres de la SFP ainsi qu'aux directeurs de laboratoire, afin de solliciter des candidatures supplémentaires. Le Conseil approuve cette proposition. Le Conseil est d'accord pour que des remises de prix soient effectuées dans des manifestations grand public, et approuve l'idée d'en organiser en région avec la section locale dont relève le lauréat.

Michèle Leduc informe le Conseil que la convention de collaboration avec la Société Tunisienne de Physique a été signée. Cette convention permettra de faire bénéficier les adhérents de la STP du tarif des membres de la SFP pour les manifestations organisées par la SFP, et réciproquement. Une première École Méditerranéenne de Physique Avancée (EMPA) est en préparation.

Geoffroy Lesur



Geoffroy Lesur a 27 ans. Ancien élève de l'ENS de Lyon, il a effectué sa thèse de doctorat au Laboratoire d'astrophysique de Grenoble. Il est actuellement en stage post-doctoral à Cambridge (UK).

La thèse de G. Lesur est un travail théorique, portant sur la modélisation et l'analyse des mécanismes de déclenchement de la turbulence par les instabilités locales des disques d'accrétion astrophysiques. Son directeur de thèse, P.Y. Longaretti, et ses deux rapporteurs considèrent qu'il s'agit d'une contribution essentielle au problème particulièrement complexe et important de l'origine de la turbulence dans les disques astrophysiques. Ils sont unanimes pour juger que G. Lesur a fait preuve de qualités exceptionnelles, tant par l'ampleur du travail accompli dans la modélisation numérique et

Prix Jeune chercheur Daniel Guinier 2007 de la SFP

l'écriture de codes hydrodynamiques et magnéto-hydrodynamiques, que par la rigueur de la discussion de leurs résultats et la pertinence des théories analytiques.

Steve Balbus, l'un des meilleurs spécialistes des disques astrophysiques, endosse les principales conclusions de la thèse : elles confirment que les sources de la turbulence ne peuvent être hydrodynamiques, et apportent une lumière nouvelle sur l'origine probable en provenance d'une instabilité magnéto-rotationnelle, en démontrant la dépendance de celle-ci des propriétés microscopiques des coefficients de dissipation. S. Balbus prédit que ce résultat va avoir un profond impact sur cette théorie, bien au-delà de cette thèse. Il conclut : "On the whole, the level of skill evidenced in this thesis is at the highest levels, comparable to the best that I have been involved with over the course of 22 years of teaching astrophysics".

Jean-Christophe Perrin



La thèse de J-C. Perrin, réalisée au Laboratoire des conducteurs ioniques du CEA/Grenoble, porte sur l'étude expérimentale de la dynamique de l'eau dans les membranes ionomères utilisées dans les piles à combustible de type PEMFC*. Il s'agit d'une contribution importante au développement technologique dans ce domaine : l'amélioration des propriétés de conduction est en effet un enjeu majeur, lié au fait que les mécanismes de diffusion du proton et le rôle de l'eau sont encore loin d'être compris. La dynamique de l'eau confinée a été quantitativement caractérisée depuis l'échelle moléculaire jusqu'à l'échelle macroscopique, par diffusion quasi élastique de neutrons et RMN, pour deux types de membranes concurrentes, le Nafion (polymère perfluoré) et les polyimides sulfonés.

Prix Jeune chercheur Saint-Gobain 2007 de la SFP

Ce travail a montré ainsi que l'hydrophobicité du squelette polymérique, associée à une structure localement lamellaire à faible hydratation, est le secret des performances inégalées du Nafion en terme de conductivité protonique, l'eau étant le vecteur de transport des protons. Quant aux membranes de polyimides, elles sont sujettes à la forte interaction eau-squelette dans une structure se comportant comme un poreux classique.

Le travail expérimental pionnier de J-C. Perrin constitue une avancée significative, apportant des informations inédites et directement utilisables. La mise en perspective et la synthèse d'une masse considérable de données a été faite de manière très rigoureuse, ce qui a démontré chez le candidat une aptitude notable à prendre du recul pour évaluer l'impact de ses découvertes.

*Pile à membrane échangeuse de protons.

Carole Diederichs



La société Michelin a accepté, pour la première fois cette année, de doter ce nouveau prix, attribué à un jeune chercheur sur le seul critère de l'excellence.

La thèse de Carole Diederichs, qui portait sur l'oscillation paramétrique optique et la génération de photons jumeaux dans des microcavités de semi-conducteurs, a été préparée au laboratoire Pierre Aigrain de l'ENS Paris sous la direction de Jérôme Tignon. Elle a été jugée particulièrement remarquable pour l'originalité de son thème, la pluridisciplinarité de son approche, la complémentarité des traitements théoriques et expérimentaux et enfin la qualité de présentation du manuscrit.

Ce travail se situe en effet à la frontière entre la physique de la matière condensée, l'optique non linéaire et l'optique quantique. C. Diederichs étudie l'oscillation paramétrique

Prix Jeune chercheur Michelin 2007 de la SFP

optique (OPO) et les corrélations quantiques dans les microcavités planaires de semi-conducteurs. Elle démontre l'apparition dans ces systèmes de nouveaux états propres résultant de l'interaction lumière-matière, dits « polaritons de microcavité », qui rendent l'OPO possible. Pour rendre ces effets utiles pour l'optique quantique, des microcavités gravées en fils photoniques ont été employées, ainsi que des microcavités triples (qui ont fait l'objet d'un brevet). La corrélation quantique entre les faisceaux a été étudiée et interprétée très complètement par de soigneuses mesures de bruit quantique. Ce travail de recherche fondamentale se situe en amont de développements potentiels pour toutes les applications de l'optique quantique dans le domaine des communications quantiques.

Après avoir effectué un stage post-doctoral au MIT (USA), Carole Diederichs vient d'être recrutée Maître de conférences à l'université de Paris VI.

Prix scientifiques

Andreas Höcker

Prix Joliot-Curie 2007 de la SFP (physique des particules)



Andreas Höcker, 41 ans, a fait sa thèse au Laboratoire de l'accélérateur linéaire d'Orsay sous la direction de Michel Davier.

Le prix Joliot-Curie 2007 lui a été attribué en reconnaissance de ses contributions importantes à deux secteurs du Modèle Standard. D'une part, pendant sa thèse et jusqu'à récemment, il a contribué aux données (physique du lepton tau) et à la phénoménologie des constantes de couplage des interactions fortes et électromagnétiques.

D'autre part, il est à la pointe de la physique de la violation de la symétrie de charge-parité (VCP) par ses contributions au sein de l'expérience BABAR : appareillage, analyses pionnières des désintégrations sans charme dans l'état final.

Il a joué un rôle très important dans le développement de « CKMfitter », un programme d'analyse globale des données

de VCP, qui a eu et a encore une grande visibilité. Ceci l'a conduit à être responsable du secteur de la compilation sophistiquée des résultats sur VCP dans les quarks, au sein du Groupe mondial de travail sur les saveurs lourdes (HFAG).

Depuis 2005, il travaille au CERN dans l'expérience ATLAS auprès du LHC. Il y a contribué fortement au travail technique du système de déclenchement, notamment au logiciel. Il anime aussi avec succès un groupe de préparation à l'analyse autour des thèmes de la supersymétrie et du boson de Higgs.

L'ensemble des contributions d'A. Höcker à la physique des particules élémentaires est exceptionnel. Il allie de grandes qualités d'instrumentaliste à des compétences remarquables en phénoménologie et en analyse. Son dynamisme et son enthousiasme en font un leader apprécié.

Hakima Mendil

Prix Irène Joliot-Curie de la jeune femme scientifique 2007



Créé en 2001, organisé en partenariat avec la Fondation d'entreprise EADS pour la recherche et avec le soutien de l'Union européenne, le prix Irène Joliot-Curie est destiné à promouvoir la place des femmes dans la recherche et la technologie en France.

Après un DUT en mesures physiques, Hakima Mendil a étudié à l'école d'ingénieurs de l'Institut de sciences et technologie à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris VI) et mené un DEA à l'École supérieure de physique et de chimie industrielle de la ville de Paris.

Elle a ensuite suivi une formation doctorale au Laboratoire Léon Brillouin (CEA-CNRS, Saclay) sous la responsabilité de Laurence Noirez. Au cours de sa thèse, elle a étudié la dynamique des polymères à l'état fondu. Elle a

montré, en utilisant les techniques de relaxation dynamique, de rhéo-optique et de diffusion des neutrons, l'existence de corrélations de type solide, loin de toute transition, dans l'état liquide dans des polymères de formule et de masse moléculaire variées. L'identification de ce mode élastique terminal est une avancée importante pour la compréhension de l'état fluide ; elle est aussi en lien direct avec les secteurs d'activité où les mécanismes interfaciaux sont importants (adhésion, lubrification, revêtements...). Elle permet de mieux appréhender et de prévoir les régimes de glissement, d'instabilités sous écoulement, les phénomènes de relaxation lente.

Hakima Mendil travaille actuellement à l'Institut Nanosciences et Cryogénie du CEA/Grenoble, sur le développement de nouveaux matériaux conducteurs ioniques à base de polymères.

François Micheron

François Micheron nous a quittés le 4 mars 2008, à l'âge de 68 ans. Docteur en génie électronique et Docteur ès sciences physiques, directeur de recherche au CNRS, il a été chez Thomson un chercheur créatif, auteur de nombreux brevets.

François Micheron fut, en 1996, lauréat du Prix « Science & défense », décerné par le ministre de la Défense ; le sujet en était « Ferroélectricité des polymères et application aux hydrophones surfaciques des sous-marins et autres transducteurs ». Nommé membre du conseil du département Sciences physiques et mathématiques du CNRS en 2000, il a toujours su endosser des responsabilités importantes.

À la SFP, François a été l'un des coordonnateurs des *Entretiens Physique-Industrie*. Quelques thèmes qui ont connu un vif succès : *Physique et chimie du recyclage* (2002), *La couleur* (2003), *Le bruit* (2004), *Électronique de puissance : du régime continu au régime impulsionnel* (2006). En 2005, Année Mondiale de la Physique, sur le thème *Physique & Jeunes Entreprises de Technologies Innovantes*, il a été l'instigateur de la rencontre de chercheurs et ingénieurs, attirés par l'innovation et l'aventure de la création d'entreprise, avec des acteurs économiques et institutionnels.

François Micheron concrétisa cette passion pour l'industrie et l'entreprise, en étant membre-fondateur de la PME *Physique-Industrie*. Pédagogue estimé, il a enseigné l'optronique à l'école Louis de Broglie entre 1994 et 2007, et fut président du Conseil scientifique du Groupe ECAM.

À la cérémonie religieuse, des représentants de la SFP et de la communauté des physiciens sont venus nombreux témoigner leur émotion et leur reconnaissance à son épouse et à ses enfants.

Jean-Claude Mialocq

Disparition

Les De Gennes Days : un hommage rendu à Pierre-Gilles de Gennes



Loïc Auvray¹, Étienne Guyon², Jean-François Joanny³ (jean-francois.joanny@curie.fr), Liliane Léger⁴ et Gilles Rubinstenn⁵

Comité d'organisation des *De Gennes Days*

1 : CNRS - 2 : ESPCI - 3 : Institut Curie - 4 : Université Paris Sud - 5 : Fondation Pierre-Gilles de Gennes.

La rencontre scientifique internationale *De Gennes Days* s'est tenue du 14 au 17 mai 2008, à la mémoire de Pierre-Gilles de Gennes, disparu il y a un an. À l'initiative du Collège de France et sous l'impulsion de la Fondation Pierre-Gilles de Gennes, elle a eu lieu dans le grand amphithéâtre Marguerite de Navarre du Collège de France, dans lequel Pierre-Gilles a enseigné pendant plus de 20 ans.

L'œuvre scientifique de Pierre-Gilles de Gennes est immense et couvre une grande partie de la physique de la matière condensée. Magnétisme, supraconductivité, matière molle, cristaux liquides, polymères, mouillage, adhésion, friction, mais aussi certaines questions associées à la biophysique de la cellule, à la chémo-taxie et aux neurosciences (olfaction), sont des domaines dans lesquels ses travaux ont eu un impact essentiel et durable. Chacun d'entre eux aurait pu donner lieu à un congrès dédié, mais nous avons pris le parti de rassembler l'ensemble de ces disciplines pour illustrer par des exposés scientifiques au meilleur niveau et présentant des résultats récents, l'influence que le travail et les idées de Pierre-Gilles ont pu avoir, et montrer les développements récents des idées qu'il avait lui-même impulsées.

L'assistance étant très variée, la tâche n'était pas aisée pour les orateurs de proposer des exposés répondant à cette attente, mais s'adressant à tous et pas seulement à un petit groupe de chercheurs spécialistes du domaine. Ils ont cependant tous réussi cet exercice avec talent, et nous souhaitons les remercier d'avoir accepté de jouer ce jeu et fait des présentations d'aussi grande qualité.

Nous avons profité de la venue à Paris de tous ces chercheurs pour organiser des rencontres plus pointues dans divers domaines de la physique de la matière condensée. Nous avons donc organisé la veille des *De Gennes Days* des colloques satellites plus spécialisés, en biophysique (organisé

par P. Silberzan et A. Buguin), sur les milieux granulaires (organisé par E. Clément et O. Pouliquen), la supraconductivité et le magnétisme (organisé par J. Lesueur) et la physique des polymères (organisé par F. Lequeux et J. Baschnagel).

En complément de ces journées, une soirée organisée par l'Espace des Sciences de l'ESPCI le vendredi soir a permis à des témoins et amis de Pierre-Gilles de présenter devant un large public des souvenirs plus personnels accompagnés de documents audiovisuels.

Pierre-Gilles de Gennes avait une manière très originale d'aborder la physique. Théoricien, il refusait les approches trop formelles et il insistait sur le fait que, quand un problème est bien compris, il doit pouvoir être expliqué en termes simples à des non-spécialistes ou à des scientifiques venant d'autres disciplines comme la chimie ou la biologie et cela, même si le résultat avait été obtenu après un calcul compliqué qu'il maîtrisait parfaitement. Cela le conduisait souvent à donner des arguments très profonds, d'une grande simplicité et extrêmement élégants. Son livre sur les polymères, qui traite de toute la physique de ces macromolécules complexes en termes de lois d'échelle, en est un superbe exemple. Non seulement il a attiré dans ce domaine toute une génération de physiciens, mais encore il a été la base de toute la physique de la matière molle.

P.G. de Gennes évitait les problématiques qu'il jugeait trop baroques et purement académiques. Il recommandait souvent aux théoriciens de s'intéresser directement aux problèmes physiques posés par les questions de société. À une époque où le partenariat entre la recherche fondamentale et la société n'est souvent exprimé qu'en termes de « valorisation », il a lui-même passé beaucoup de temps à travailler sur des problématiques industrielles dont il avait l'art de tirer des problèmes très fondamentaux. C'est ainsi qu'il s'est intéressé à la friction et à l'adhésion, qui ont souvent été considérées par les physiciens comme des domaines peu nobles devant être laissés aux

Le programme complet des *De Gennes Days* et les résumés des communications peuvent être trouvés sur le site :

www.fondation-pgg.org/events/degennessdays/fr/degennessdays.php

(onglet conférenciers, cliquer sur le nom du conférencier, puis sur abstract)

À gauche : P.G. de Gennes en 1977, lors de la remise du prix Ampère.

À droite : P.G. de Gennes au Collège de France, lors du pot de départ en retraite du sous-directeur du Laboratoire de Physique de la Matière condensée, Hubert Hervet, le 23 Janvier 2004.



ingénieurs, et qu'il a en grande partie révolutionnés. P.G. de Gennes avait aussi une approche très pluridisciplinaire des problèmes. Il savait jouer de sa vaste culture, qui allait de la physique à la chimie jusqu'à de nombreux domaines de la biologie, et pouvait ainsi apporter des éclairages très variés sur un problème. Il savait, par exemple, raisonner comme un chimiste en termes de réactions chimiques si cela était adapté, comme il pouvait faire des analogies limpides avec les domaines les plus abstraits de la physique théorique. Il nous laisse cette approche originale de la physique et cette nouvelle façon de penser très efficace et pragmatique ; c'est ce que nous voulions refléter lors de ces journées et c'est, nous en sommes aujourd'hui convaincus, ce qui en est ressorti.

Les exposés des *De Gennes Days* ont bien montré l'impact actuel des travaux de P.G. de Gennes dans tous les domaines de la matière condensée dure et molle. Un exemple frappant est le nouveau mécanisme de formation de paires dans les supraconducteurs, qu'il a récemment

proposé. Les divers domaines de la physique de la matière molle : cristaux liquides, polymères, colloïdes, mouillage, milieux granulaires, dans lesquels P.G. de Gennes a souvent été un grand précurseur, ont tous été abordés, mettant en valeur leur grande actualité et les développements vers la chimie ou les applications industrielles. Enfin, certaines thématiques à l'interface entre la physique et la biologie ou même la neurobiologie, auxquelles P.G. de Gennes s'était intéressé ces dernières années à l'Institut Curie, ont été présentées.

Cet ensemble, qui couvre bien l'héritage que nous laisse Pierre-Gilles de Gennes, est très vaste et reste aujourd'hui complexe. Il constitue une mine extraordinaire de questions qui devront être abordées à sa manière, de façon pluridisciplinaire, dans les années à venir. La culture de Pierre-Gilles, son ouverture d'esprit, sa manière de choisir les sujets sur lesquels il travaillait, nous semblent un formidable exemple pour les jeunes chercheurs, et pour nous une raison de relever ces défis qu'il a lancés. ■

« C'est l'inconnu qui m'attire. Quand je vois un écheveau bien enchevêtré, je me dis qu'il serait bien de trouver un fil conducteur. »

Pierre-Gilles de Gennes

Pour info

Nouvelles de la chimie

Depuis juillet 2008, la Société Française de Chimie est devenue la SOCIÉTÉ CHIMIQUE DE FRANCE (SCF).

Voir l'éditorial du Bureau de la SCF : « La Société Chimique de France : un nouvel essor », qui peut être téléchargé sur le site de la SCF, www.societechimiquedefrance.fr

La lettre d'information électronique bimensuelle de la SCF, « SCF info en ligne », est désormais directement téléchargeable sur ce site.

Les industriels de la chimie lancent un site d'information destiné au grand public, pour expliquer leur industrie, sa raison d'être, ses enjeux et répondre aux questions concernant la société dans son ensemble : www.reactions-chimiques.info

Rénovation du Palais de la découverte

Le Palais de la découverte va disposer de 1500 m² de nouveaux espaces consacrés à la matière et à l'énergie. La scénographie de ce nouvel espace joue de la complémentarité entre les expériences scientifiques et le monument historique, mettant notamment en valeur sa superbe verrière. Ouverture prévue des nouvelles salles : novembre 2009.

Pour en savoir plus, téléchargez la plaquette complète du projet sur : www.palais-decouverte.fr/mecenat

Cette rénovation sera financée grâce aux subventions publiques et au produit d'une souscription nationale.

Associez-vous dès aujourd'hui à ce projet en retournant le bulletin de souscription (téléchargeable sur le site de la SFP, www.sfpnet.fr) à la Société des Amis du Palais de la découverte, Avenue Franklin D. Roosevelt, 75008 Paris.

La main à la pâte : un malentendu à dissiper

L'article de José-P. Pérez, « La Main à la Pâte, oui mais avec la Tête – Régressions dans l'enseignement de la physique », publié dans le numéro 9 de *Reflets de la physique* (p. 17), a suscité quelques réactions de lecteurs. Nous publions ici un courrier des responsables de l'action « La main à la pâte », qui clarifie certains points qui pouvaient prêter à confusion. La rédaction

Dans un article brillant [1], notre collègue José Pérez relie quelques judicieuses observations sur l'enseignement de la physique au lycée et en classes préparatoires à une supposée généralisation, à tous niveaux de l'enseignement, de la pédagogie prônée par *La main à la pâte*. Dissipons donc quelques malentendus, que son texte pourrait susciter. Chacun sait qu'aujourd'hui la pédagogie d'investigation (*Inquiry Based Science Investigation, IBSE*) se met en place un peu partout dans le monde [2] lors de la scolarité primaire, puisque de nombreux et récents rapports [3] mettent l'accent sur l'importance de nourrir *l'âge d'or de la curiosité* chez l'enfant, si l'on souhaite qu'il ne considère plus tard la science comme sans intérêt ou inaccessible [4].

Le succès, en France et au-delà, de dix années d'efforts dans ce sens nous a conduits à examiner une éventuelle prolongation de cette pédagogie au collège. En effet, celui-ci, commun à tous les élèves, doit plutôt transmettre une *science pour tous*, que cette pédagogie facilite : c'est dans cet esprit que nous avons quelque peu collaboré à l'écriture du socle commun de connaissances et de compétences, en y mettant en avant la *démarche d'investigation*, selon le terme désormais consacré. Plus important peut-être, nous avons proposé en 2006 au ministère de l'Éducation nationale la mise en place d'une expérimentation qui touche, lors de cette rentrée, une quarantaine de collèges pilotes en classes de 6^e et 5^e : celle-ci réintègre enfin un enseignement de physique en 6^e, tout en l'intégrant dans un cours de science et technologie délivré par un unique professeur [5]. Là encore, parce que nous constatons combien professeurs des écoles et même de collège éprouvent de difficultés à quitter un enseignement purement frontal de la science, nous mettons en avant le rapport au concret et à l'expérience, mais bien entendu pour apprendre à raisonner et à s'exprimer... l'expression *La main à la pâte*, qui fit florès un peu malgré nous, peut sur ce point être trompeuse !

Réflexion culturelle, souhaite à juste titre notre collègue ? Si la culture débute par un emploi à bon escient de sa propre langue, *La main à la pâte* n'a cessé de mettre l'accent sur ce point : apprendre à lire et écrire, bien sûr, mais aussi avec la science, puis sonder de celle-ci, même de façon élémentaire, les émergences historiques qui sont si révélatrices du cheminement de la pensée [6].

Viennent la fin du collège (4^e et 3^e) puis le lycée, et avec ce dernier la spécialisation progressive des élèves. Jamais nous n'avons prôné que cette pédagogie d'investigation, qui a ses limites, devienne le paradigme de tout enseignement scientifique. Le « concret » d'un électron ou d'un champ magnétique, sans parler de celui d'un trou noir ou d'une exoplanète, n'est guère à portée d'une main... à la pâte ! Et le *Hands-on Universe* – traduit en : L'univers à portée de la main ou *Lunap* – de notre ami Pierre Encrenaz [7] signifie seulement, si l'on peut dire, un accès direct à des observations astronomiques authentiques, dont le dépouillement est proposé au lycéen.

On peut longuement débattre de l'origine des lacunes de nos étudiants lorsqu'ils abordent la licence : déficience dans l'approche expérimentale ou absence de recul théorique. Mais il est une chose dont nous sommes certains : un élève qui quitte le collège sans avoir jamais rencontré ce mélange d'observation, de questionnement, d'hypothèse et d'expérience sur les phénomènes du monde qui l'entoure ne sera que bien rarement disposé à aimer et pratiquer, au lycée, et une approche expérimentale et une réflexion théorique sur ceux-ci.

Pierre Léna (pierre.lena@obspm.fr)

Astrophysicien, délégué à l'éducation et la formation de l'Académie des sciences

Yves Quéré

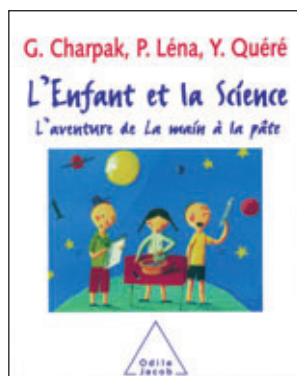
Physicien, Académie des sciences

Édith Salties

Physicienne, équipe *La main à la pâte*

Références

- 1 • J.P. Pérez, *Reflets de la physique*, 9 (2008) 17
- 2 • Voir *La main à la pâte dans le monde*, Brochure téléchargeable sur www.lamap.fr
- 3 • Par exemple : O.C.D.E., *Encouraging Students Interest in Science and Technology Studies*, rapport de l'O.C.D.E., Paris, 2008 et J. Osborne & J. Dillon, *Science Education in Europe: Critical Reflections*, rapport pour la Nuffield Foundation, janv. 2008.
- 4 • G. Charpak, P. Léna, Y. Quéré, *L'Enfant et la science*, O. Jacob, Paris, 2005.
- 5 • Cette expérimentation est accessible par www.science-techno-college.net.
- 6 • Voir par exemple des publications de *La main à la pâte*, telles que *L'Europe des découvertes* (Le Pommier, 2005) ou *Les sciences dans le monde arabe* (Le Pommier, sous presse, 2008).
- 7 • Voir *Lunap* sur le site sciencesalecole.obspm.fr/



Voir la note de lecture de P. Fontes sur *L'enfant et la science* dans *Reflets de la Physique* n°1, p. 30.

Appel des cotisations SFP et abonnements pour 2009

À retourner rempli quel que soit le mode de règlement choisi
à SFP/Fichier – 33 rue Croulebarbe, 75013 PARIS – Tél.: 01 44 08 67 10 – Fax : 01 44 08 67 19

NOM : Prénom :
N° d'adhérent : Date de naissance :
Adresse professionnelle :
.....
Tél. : Fax : Courriel :
Adresse personnelle
.....
Adresse d'expédition du courrier : professionnelle personnelle

| TARIFS ANNÉE 2009 | Cotisation | Reflets de la Physique | Europhysics News* | MONTANT |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------------------|-------------------|---------|
| Membre SFP | | | | |
| <input type="radio"/> en activité | 95 € | - | 4 € | ..... |
| <input type="radio"/> en activité depuis moins de 3 ans <input type="radio"/> en retraite | 59 € | - | 4 € | ..... |
| <input type="radio"/> membre de l'UdPPC <input type="radio"/> membre de l'UPS | 59 € | - | 4 € | ..... |
| <input type="radio"/> membre d'une Société de physique nationale européenne, résidant dans son pays | 59 € | - | 4 € | ..... |
| <input type="radio"/> à la recherche d'emploi | 26 € | - | 4 € | ..... |
| Jeune sociétaire | | | | |
| <input type="radio"/> lycéen <input type="radio"/> étudiant <input type="radio"/> école d'ingénieur <input type="radio"/> doctorant | 26 € | - | 4 € | ..... |
| _____ La cotisation SFP comprend l'abonnement à Reflets de la Physique _____ | | | | |
| Partenariat | | | | |
| <input type="radio"/> membre de la Sté Française de Neutronique (SFN) | 54 € | 27 € |  | ..... |
| Cotisation groupée SFP-partenaire | | | | |
| <input type="radio"/> membre de la Sté Française de Chimie (SFC) | 189 € | 27 € |  | ..... |
| <input type="radio"/> membre du Groupe Français des Polymères (GFP) | 89 € | 27 € |  | ..... |
| <input type="radio"/> membre du Groupement National de Microscopie Électronique à Balayage et de Microanalyses (GN-MEBA) | 110 € | 27 € |  | ..... |
| Une partie de la cotisation est déductible de l'impôt sur le revenu (66% en 2007) et un reçu vous sera envoyé. | | | | |
| * L'abonnement à Europhysics News vaut comme acte d'adhésion à titre collectif à l'European Physical Society. ** Reflets de la Physique seul : 23 € Europhysics News seul : 19 € | | | | |
| Personne extérieure à la SFP : <input type="radio"/> Abonnement à Reflets de la Physique : 43 € | | | | |
| Contribution volontaire : <input type="radio"/> Droits de l'homme <input type="radio"/> Nord-Sud <input type="radio"/> Femmes et physique | | | | |
| Société Européenne de Physique (EPS) | | | | |
| <input type="radio"/> Cotisation membre individuel appartenant à la SFP | | 20 € |  | ..... |
| Tarif réduit pour les membres en activité depuis moins de 3 ans et pour les membres retraités. (Les membres individuels EPS reçoivent automatiquement Europhysics News.) | | 15 € |  | ..... |
| <input type="radio"/> Abonnement de membre individuel à « epl » (Europhysics Letters) | | 163 € |  | ..... |
| Abonnements préférentiels pour les membres SFP | | | | |
| <input type="radio"/> La Recherche 1 ^{er} abonnement : oui <input type="radio"/> non <input type="radio"/> | France 48 € | Étranger 62 € |  | ..... |
| <input type="radio"/> Pour la Science 1 ^{er} abonnement : oui <input type="radio"/> non <input type="radio"/> | France 48 € | Étranger 60 € |  | ..... |

TOTAL COTISATIONS ET ABONNEMENTS

RÈGLEMENT - Je règle le montant total ci-contre :

- par prélèvement autorisé antérieurement
 par prélèvement à partir de 2009
 par chèque bancaire ou postal ci-joint
 sur facturation (ci-joint bon de commande avec adresse de facturation)

Date et signature :

Règlement possible sur notre site www.sfpnet.fr

* Les règlements par mandat cash ne sont pas acceptés.

François Arago, un savant généreux – Physique et astronomie au XIX^e siècle

James Lequeux (EDP Sciences, 2008, 538 p., 35 €)



Le livre de James Lequeux nous fait parcourir une période très riche de l'histoire des sciences. La vie d'Arago a été multiple, son action va de l'extension de la méridienne à l'abolition de l'esclavage, il est à la fois astronome, physicien, promoteur des nouvelles techniques et homme politique. Couvrir tous ces domaines demande un travail d'érudition impressionnant, reposant sur une analyse documentaire aussi riche que variée.

James Lequeux nous fait découvrir les institutions scientifiques françaises de l'époque, dont trois joueront un rôle majeur dans la vie d'Arago. L'École polytechnique : Arago y est reçu à 17 ans, il y sera professeur, commandant provisoire, puis membre du Conseil de perfectionnement. L'Académie des sciences : il y est élu très jeune, à 23 ans, et en sera le Président puis le Secrétaire perpétuel, poste qu'il occupera de 1830 jusqu'à sa mort (en 1853). Ce poste stratégique lui permet de favoriser le développement des sciences et des techniques ; par ailleurs, il créera les Comptes Rendus de l'Académie des sciences, introduira les séances publiques et rédigera de nombreuses notices biographiques. L'Observatoire de Paris : il y logera presque toute sa vie, en deviendra le directeur, renouvellera les instruments, fera ses fameux cours publics d'astronomie populaire (de 1813 à 1846) et ouvrira la voie à Le Verrier pour la découverte de Neptune.

On découvre également dans ce livre Arago opticien avec ses mesures de la réfraction, l'introduction du concept de vitesse de la lumière constante, sa découverte de la polarisation rotatoire chromatique, sa vérification de la loi de Malus, l'interprétation de la scintillation des étoiles, la conception de l'expérience du miroir tournant (qui sera réalisée par Foucault), sans oublier bien sûr ses travaux avec Fresnel sur les expériences d'interférence. Arago travaille avec le même enthousiasme lors de la naissance de l'électromagnétisme ; il fait équipe avec Ampère et découvre le magnétisme de rotation. Il est aussi géophysicien et météorologue : on le voit étudier les aurores boréales, faire de très nombreuses mesures sur le magnétisme terrestre, installer une station météorologique à l'Observatoire, s'intéresser (avec son ami Humboldt) à la température des mers et aux courants océaniques. James Lequeux nous indique également qu'Arago peut être considéré comme le père de l'astrophysique. Notre savant est un infatigable promoteur de la science : il participe très activement à la modernisation de la France avec ses travaux sur les machines à vapeur, l'introduction des phares de Fresnel, la promotion du télégraphe et de la photographie, l'implication dans l'émergence des Écoles des Arts et Métiers, etc.

Mais Arago n'est pas seulement un scientifique, c'est également un homme politique : il est député des Pyrénées-Orientales, conseiller général du département de la Seine, ministre de la Marine et de la Guerre ; membre du gouvernement provisoire de 1848 ; il exerce même, du 5 mai au 25 juin 1848, les fonctions de chef de l'État. C'est donc bien un personnage brillant, au caractère affirmé, à l'enthousiasme débordant que nous révèle, avec une richesse d'information remarquable, James Lequeux. Comme l'auteur le souligne, la dispersion de ses travaux fait qu'en tant que physicien il ne peut pas être considéré au même rang qu'un Fresnel ou un Ampère. Il reste que sa vie et son œuvre n'en sont pas moins exemplaires ; c'est avec plaisir que la lecture du livre de James Lequeux nous les font découvrir.

Jean-Claude Boudenot
(Thalès, Palaiseau)

MAPPi08

L'école de physique *Modern Applications of Trapped Ions (MAPPi08)*, organisée par Martina Knoop (PIIM Marseille) et Laurent Hilico (LKB Évry), a eu lieu au centre de physique des Houches en Haute-Savoie, du 18 au 23 mai 2008. Elle a permis de réunir plus de 50 jeunes chercheurs autour des responsables d'équipes nationales et internationales confirmées ou nouvellement formées. Huit cours, sept exposés de revue et cinq exposés "hot topics" ont permis d'aborder de manière complète quatre thèmes en fort développement de la physique des ions : *microfabrication des pièges à ions, information quantique, mesures de précision et molécules et interactions.*

Les actes de Mappi08 feront l'objet d'un numéro spécial du *Journal of Physics B*. Les cours, exposés et posters sont disponibles sur www.spectro.jussieu.fr/Mappi08/ ou auprès de martina.knoop@univ-provence.fr et laurent.hilico@univ-evry.fr.



Mappi08 est une école thématique du CNRS, soutenue par l'université d'Évry, l'université de Provence, le ministère des Affaires étrangères, l'IFRAF, le réseau INTERCAN, les laboratoires LKB et PIIM, l'IOP et Spectra-Physics.

Einstein, un siècle contre lui

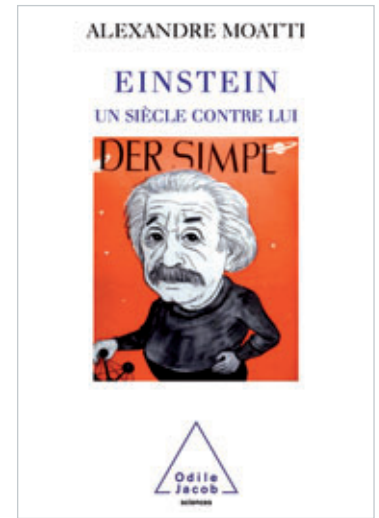
Alexandre Moatti (Odile Jacob, 2007, 305 p., 21,90 €)

« Encore un livre sur Einstein ! » dira-t-on. Mais celui-ci est fort original : il est consacré à un phénomène remarquable, l'anti-relativisme. Einstein a suscité pendant des décennies incompréhension, critiques, haine et ressentiment. Alexandre Moatti nous en explique les raisons scientifiques, philosophiques, politiques, sociales ou idéologiques, et il présente une galerie de portraits des sceptiques et détracteurs. Certains sont des personnages pittoresques, « flibustiers de la science », ou inquiétants, antisémites de droite et de gauche. Parmi d'autres, plus éminents, on trouve des prix Nobel de physique (Arrhenius, Guillaume, Lenard, Stark), de médecine (Richet) ou d'économie (Allais), des physiciens influents (Duhem, Fabry, Bouasse), des mathématiciens (Picard, Painlevé, Mellin), des philosophes (Bergson, Maritain, Alain), jusqu'à Henry Ford et au champion d'échecs Lasker. Leurs griefs contre la relativité sont fort divers : manque de justification expérimentale directe, mathématiques abstraites, métaphysique et non science, plagiat, science « germanique », ou « juive », ou « bourgeoise », internationalisme, matérialisme ou au contraire mysticisme, médiatisation abusive.

Le livre passe en revue les événements anti-relativistes du XX^e siècle, déclarations publiques, articles, livres, congrès, réactions d'Einstein, péripéties de sa visite à Paris et de son prix Nobel. Bien documenté, il replace les protagonistes dans le cadre historique ; j'ai par exemple apprécié l'analyse des raisons des faiblesses de la physique, notamment théorique, en France entre 1850 et 1950. Il nous offre un florilège de citations inédites, amusantes et parfois effrayantes comme l'article publié par Stark dans *Nature* en 1938 ou la préface du manuel universitaire de physique (en 4 volumes) de Lenard, intitulé *Deutsche Physik*. Conjonction étrange, la « physique juive » formaliste que stigmatise ce dernier ressemble à *La Science allemande* que critique Duhem dans un livre publié sous ce titre en 1915 !

J'ai pris grand plaisir à la lecture de cet ouvrage riche et passionnant. Il ouvre des horizons surprenants sur le passé, et aide aussi chercheurs ou enseignants à en tirer des leçons concernant la diffusion de la science actuelle. Alexandre Moatti plaide pour que celle-ci fasse partie intégrante de la culture et qu'elle suscite curiosité ou émerveillement auprès d'un large public ; dans cette perspective, son livre est exemplaire.

Roger Balian



NOUVEAUTÉ **NOUVEAUTÉ**
NOUVEAUTÉ

Cet ouvrage expose des méthodes et des outils mathématiques omniprésents en physique et en sciences de l'ingénieur : fonctions de réponse, relations de Kramers-Kronig, fonctions de Green, méthode du col. La présentation privilégie arguments et interprétations physiques sans pour autant perdre la rigueur indispensable. Des introductions synthétiques en décrivent les caractéristiques essentielles, établissant ainsi connexions et analogies entre différents domaines. Elles sont complétées d'une vingtaine d'applications portant sur des domaines variés de la physique (électromagnétisme, hydrodynamique, physique statistique, mécanique quantique) qui sont traitées en détail, et accompagnées d'exercices avec des éléments de solution. La lecture autonome de l'ouvrage est facilitée par une présentation pédagogique évitant les développements trop techniques, ainsi que par la description schématique d'outils importants en annexe. Le public concerné comprend naturellement les étudiants physiciens en Master ou en Doctorat, quelle que soit leur spécialité. Cet ouvrage étant également conçu comme un manuel, il s'adresse aussi aux chercheurs, enseignants, élèves ingénieurs et ingénieurs.

Angel Alastuey est directeur de recherche au laboratoire de physique à l'École normale supérieure de Lyon. Marc Mugro est maître de conférences et mène ses recherches au laboratoire de physique à l'École normale supérieure de Lyon. Pierre Pujol est professeur et travaille au laboratoire de physique théorique à l'Université Paul Sabatier de Toulouse.

• Septembre 2008 • 42 €
• 978-2-7598-0043-8 • 406 pages

Ce livre appartient à la série "Physique" de la collection **Savoirs Actuels**, collection dirigée par Michèle Leduc.

Ouvrage disponible chez votre libraire habituel et sur www.edpsciences.org



1



2



3



4

Le musée Curie,

lieu de mémoire et d'histoire

11, rue Pierre et Marie Curie – 75005 Paris
Informations pratiques : 01 56 24 55 33
M° Place Monge / RER Luxembourg
www.curie.fr/musee
musee@curie.fr

Le musée est ouvert au public
du mardi au vendredi de 10 h à 18 h
sauf jours fériés et mois d'août
Entrée libre
Groupes : sur réservation uniquement
visites.musee@curie.fr
Tél./fax : 01 56 24 55 31

Archives historiques

consultation des documents sur RDV uniquement
Tél. : 01 55 43 14 75 / 74 (iconographie)
Fax : 01 55 43 14 77
documentation.musee@curie.fr

Le musée Curie est situé dans la partie la plus ancienne de l'Institut Curie, le Pavillon Curie de l'Institut du Radium, dont la création date de 1909. Ce bâtiment abritait un laboratoire consacré à l'étude des rayonnements et des corps radioactifs, dirigé par Marie Curie de 1914 à 1934. C'est dans ce centre de recherches de renommée internationale que Frédéric et Irène Joliot-Curie obtiennent le prix Nobel de chimie en 1935 pour la découverte de la radioactivité artificielle.

Le bureau de Marie Curie et son laboratoire de chimie ont été conservés et sont présentés tels qu'ils étaient à l'époque.

Situé au cœur du 5^e arrondissement de Paris, l'espace de visite propose au public de découvrir l'histoire de la radioactivité et de ses premières applications médicales, dans laquelle la « famille aux cinq Prix Nobel » tient une place centrale. À la fois lieu de mémoire et musée d'histoire des sciences, le musée Curie est constitué d'un espace d'exposition permanente et d'un centre d'archives historiques. Ce patrimoine unique regroupe des instruments, des archives, une bibliothèque, des photographies et de nombreux documents sur les Curie, les Joliot-Curie et sur leurs collaborateurs de l'Institut du Radium et de la Fondation Curie.

Le musée Curie est une Unité Mixte de Service entre le CNRS/IN2P3 et l'Institut Curie. Ses missions s'articulent selon trois axes :

- la conservation du patrimoine,
- l'accueil et l'information des publics,
- la diffusion de la culture scientifique et technique.



5

1. Bureau occupé par Marie Curie de 1914 à 1934 - 2. Laboratoire de chimie de Marie Curie - 3. Pierre et Marie Curie dans le « hangar de la découverte » à l'ESPCI en 1898 - 4. Irène et Frédéric Joliot-Curie en 1934, année de la découverte de la radioactivité artificielle, dans leur laboratoire à l'Institut du Radium - 5. Publicité de 1934 pour les produits de beauté « Tho-Radia » à base de Thorium et de Radium – **En filigrane** : Entrée de l'Institut du Radium (aujourd'hui musée Curie) dans les années 1920.