

► **Composition atmosphérique
et bilan radiatif**



Dossier supraconductivité

- Semi-conducteurs supraconducteurs du groupe IV

Images de la Physique

- Applications thérapeutiques des plasmas froids

Avancées de la recherche

- Accélérateurs à plasma laser

Science et société

- Des chercheurs en herbe

Vers une Société Française de Physique plus efficace

La physique, discipline centrale de notre connaissance de la nature, est au cœur d'un enjeu majeur dans le monde d'aujourd'hui, celui de l'innovation, de la recherche, du développement scientifique et technique, de la formation des cadres scientifiques du plus haut niveau et, finalement, de l'attractivité de notre pays. La physique est ainsi une des principales clés de l'adaptation à la compétition mondiale de nos industries, de nos capacités de progrès technologique dans pratiquement tous les champs disciplinaires, de la médecine aux sciences de l'ingénieur, du spatial aux nanotechnologies, du nucléaire au solaire, mais aussi de la technologie à la philosophie, de l'industrie à l'art. Elle est la discipline du 21^e siècle partout présente, à chaque instant, dans le quotidien de chacun d'entre nous.

Pourtant, malgré son importance et ses succès récents en matière de reconnaissance internationale, la physique hérite en France d'une situation paradoxale. Son poids relatif dans l'enseignement est en décroissance régulière. Ceci commence au lycée où le volume horaire des cours de physique diminue, et se poursuit à l'Université où le nombre d'étudiants baisse de manière inquiétante. De leur côté, la majorité des grandes écoles privilégie d'autres domaines plus directement adaptés à l'industrie ou à l'économie. Pour couronner le tout, la gestion actuelle de la recherche favorise les projets à caractère soi-disant finalisé, désavantageant ainsi la prise de risque indispensable à la production de ruptures technologiques majeures.

Créée en 1873, la Société Française de Physique (SFP) aurait dû avoir comme vocation de couvrir l'ensemble des sous-disciplines dérivées. Historiquement, ce ne fut pas le cas, avec comme résultat un affaiblissement de l'audience des physiciens. L'un de nos objectifs est donc de nous concerter avec les autres sociétés savantes qui nous sont proches, comme l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie, par exemple. Ceci devrait être facilité par le fait que les divisions thématiques et les commissions de la SFP couvrent un large spectre, incluant souvent celui de ces sociétés.

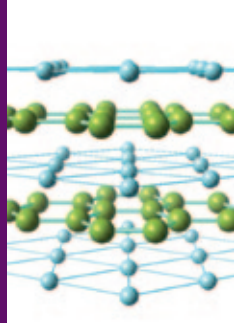
Entrées dans un processus de refonte, les instances de la SFP ont la volonté de faire évoluer cette situation de manière à rendre plus audible la voix des physiciens. Pour ce faire, plusieurs actions sont en cours :

- Refonte totale du site *web*, avec externalisation des aspects techniques et mise sur pied d'une équipe interne susceptible de l'alimenter efficacement.
- Utilisation de ce site pour mieux coordonner et valoriser les actions des sections locales, des divisions thématiques et des commissions, dont les travaux et les réalisations sont considérables et pas suffisamment visibles.
- Gestion des congrès labellisés SFP à partir du nouveau site *web*.
- Incitation à l'implication dans la vie de la SFP de tous les acteurs de la recherche et de l'enseignement de la physique, à commencer par les étudiants et les jeunes chercheurs.
- Mise en valeur de notre revue *Reflets de la Physique*, vecteur de notre communication.
- Rapprochement avec les organismes de recherche, déjà largement entamé avec l'Institut de Physique du CNRS.
- Renforcement de nos relations avec les industriels, avec la nomination de Marc Stehle à la tête de la commission correspondante.

Nous espérons que tout ceci confortera la position des physiciens dans la société française actuelle.

Gérard Bonneaud
Secrétaire général

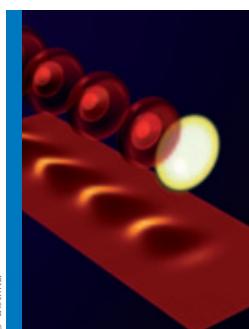
Michel Lannoo
Président



► p. 8



► p. 11



► p. 23



► p. 37



Préparation du vol d'un spectromètre UV-visible qui mesure les concentrations de O_3 , N_2O et H_2O atmosphériques, en 2012 au Brésil (LATMOS/GSMA, CNRS). Voir article, p. 28.

Éditorial

- 2 Vers une Société Française de Physique plus efficace
Gérard Bonneaud, Michel Lannoo

Dossier « supraconductivité »

- 4 Les semi-conducteurs supraconducteurs du groupe IV
Thierry Klein, Xavier Blase, Christophe Marcenat, Claude Chapelier et Étienne Bustarret

Images de la physique

- 10 La genèse de l'atome de Bohr
Bernard Pourprix
- 17 Applications thérapeutiques des plasmas froids atmosphériques
Jean-Michel Pouvesle et Éric Robert

Avancées de la recherche

- 23 Accélérateurs à plasma laser : principes et applications
Victor Malka, Cédric Thauray, Sébastien Corde, Kim Ta Phuoc et Antoine Rousse
- 27 L'héritage de Norman Ramsey (1915-2011)
Daniel Kleppner

Science et société

- 28 Composition atmosphérique et bilan radiatif
Jean Poitou
- 34 Des chercheurs en herbe à l'école Boucaut
Évelyne Fillon, Maud Lebreton, Béatrice Madignier, Valérie Polge et Yves Noat
- 38 Poils mouillés : une expérience de recherche et de partage de savoirs...
José Bico

Au sein et autour de la SFP

- 39 Vie de la SFP
- 40 MESURExpoVISION 2012
- 41 Prix scientifiques
- 43 Portrait : Marie-Agnès Tordeux, accélératrice de particules

Reflète de la physique et ses lecteurs

- 44 Tribune libre : Quelle physique pour le 21^e siècle ?
Étienne Guyon
- 45 Index des articles publiés dans *Reflète de la physique* en 2012
- 46 Note de lecture
- 46 Courrier des lecteurs
- 47 Message de la rédaction

Comité de rédaction

Président : Jean-Pierre HULIN
Membres : Michel BELAKHOVSKY - Fabienne CASOLI -
Anne DAVAILLE - Olivier DULIEU - François GRAVER -
Étienne GUYON - Stéphane LABROSSE - Michèle LEDUC -
Roland LEHOUCQ - Stéphane MAZOUFFRE - Vincent MOSSER -
Charles de NOVION - Stefano PANEBIANCO - Marios PETROPOULOS -
Sophie REMY - Claude SÉBENNE - José TEIXEIRA - Jean VANNIMENUS

Ce numéro a été préparé avec la participation du comité de rédaction des *Images de la Physique* (rédacteur en chef, Marc Moniez) et de l'Institut de Physique du CNRS.

Directeur de la publication

Gérard BONNEAUD
Rédacteur en chef : Charles de NOVION
Conception : Lætitia MORIN - Keith VILLEMEUR
Réalisation graphique : Lætitiamorin@free.fr
Suivi de rédaction : Agathe CYMER
Service publicité : Jessica EKON - Tél. : 01 69 18 92 40
e-mail : publicite@edpsciences.org

Dépôt légal : 2^e trimestre 2013
ISSN : 1953-793X - e-ISSN : 2102-6777
© SFP - Édité à 9 100 exemplaires

Imprimerie Jouve

11, bd de Sébastopol, 75036 Paris Cédex 01
Tél. : 01 44 76 54 40
Société Française de Physique
33, rue Croulebarbe, 75013 Paris
Tél. : 01 44 08 67 10 - Fax : 01 44 08 67 19
e-mail : 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.fr
Serveur : www.reflètesdelaphysique.fr

Les semi-conducteurs supraconducteurs du groupe IV

Thierry Klein⁽¹⁾ (thierry.klein@grenoble.cnrs.fr), Xavier Blase⁽¹⁾, Christophe Marcenat⁽²⁾, Claude Chapelier⁽²⁾ et Étienne Bustarret⁽¹⁾

(1) Institut Néel, CNRS et Université Joseph Fourier, BP 166, 38042 Grenoble Cedex.

(2) SPSMS, UMR-E CEA / UJF Grenoble 1, INAC, 38054 Grenoble.

Associer semi-conducteurs et supraconducteurs est une idée *a priori* surprenante, tant les propriétés électroniques de ces deux états sont opposées. Néanmoins, le couplage entre les électrons et les modes de vibration du réseau atomique, à l'origine de la supraconductivité conventionnelle, peut être très fort dans les semi-conducteurs du groupe IV. Leur caractère semi-conducteur est dû au fait que les électrons sont impliqués dans les liaisons covalentes qui assurent la cohésion du matériau et n'interviennent pas dans la conductivité électrique.

En rendant ces liaisons covalentes conductrices, on obtient une nouvelle famille de supraconducteurs. La température critique des matériaux covalents atteint aujourd'hui 39 K dans MgB₂, mais pourrait largement dépasser cette valeur dans certains composés carbonés.

Historique

Lorsqu'il s'agit de supraconductivité, l'attention est souvent focalisée sur les records de température critique (T_c) et la compréhension des mécanismes « non conventionnels » conduisant à ces températures élevées. Néanmoins, le domaine de la supraconductivité traditionnelle, véhiculée par l'interaction entre électrons et vibrations du réseau (les *phonons*) et décrite par la théorie de Bardeen, Cooper et Schrieffer (BCS) [1], traverse périodiquement des périodes de jouvence liées à la synthèse de nouveaux matériaux, ou à la mise en évidence d'une transition électronique particulière dans des matériaux déjà connus. L'idée qu'un semi-conducteur dopé puisse devenir supraconducteur avait déjà fait son chemin dans les années 1960. La supraconductivité fut même observée à l'époque dans SrTiO₃ et Ge_{1-x}Te, mais elle ne suscita que peu d'intérêt, du fait que les températures critiques étaient inférieures à 0,5 K [2]. Au contraire, la découverte spectaculaire, en 2001, de la supraconductivité de MgB₂, avec $T_c \sim 39$ K, soit près de deux fois le record établi par

Nb₃Ge en 1973 ($T_c \sim 23$ K), relança sérieusement l'intérêt pour les supraconducteurs conventionnels.

Au-delà de la faible masse des atomes de bore, qui conduit à des fréquences de phonons élevées favorisant ainsi une haute T_c , la valeur exceptionnelle de 39 K est la conséquence directe de la contribution à la conduction électronique des liaisons *covalentes* (notées σ) du bore (liaisons planaires de type sp², voir les schémas A et B de la figure 1). MgB₂ cristallise dans une structure hexagonale constituée de *feuillet*s de bore (fig. 1c, p. 5 ; fig. 5, p. 8), avec une structure en nid d'abeilles équivalente à celle du graphite (fig. 1a), séparés par les atomes de Mg. Dans le graphite, la bande électronique formée par les liaisons σ assure la cohésion des plans et est située bien en dessous de l'énergie de Fermi E_F (fig. 2a). Par conséquent, la conduction n'est pas assurée par les électrons σ , mais uniquement par le recouvrement des orbitales p_z (liaisons π perpendiculaires aux plans) des atomes d'un même plan ou de plans adjacents. Dans MgB₂, la présence des ions Mg²⁺ entre les *feuillet*s de bore conduit à un décalage important des énergies, jusqu'à

► Couplage fort entre électrons et phonons

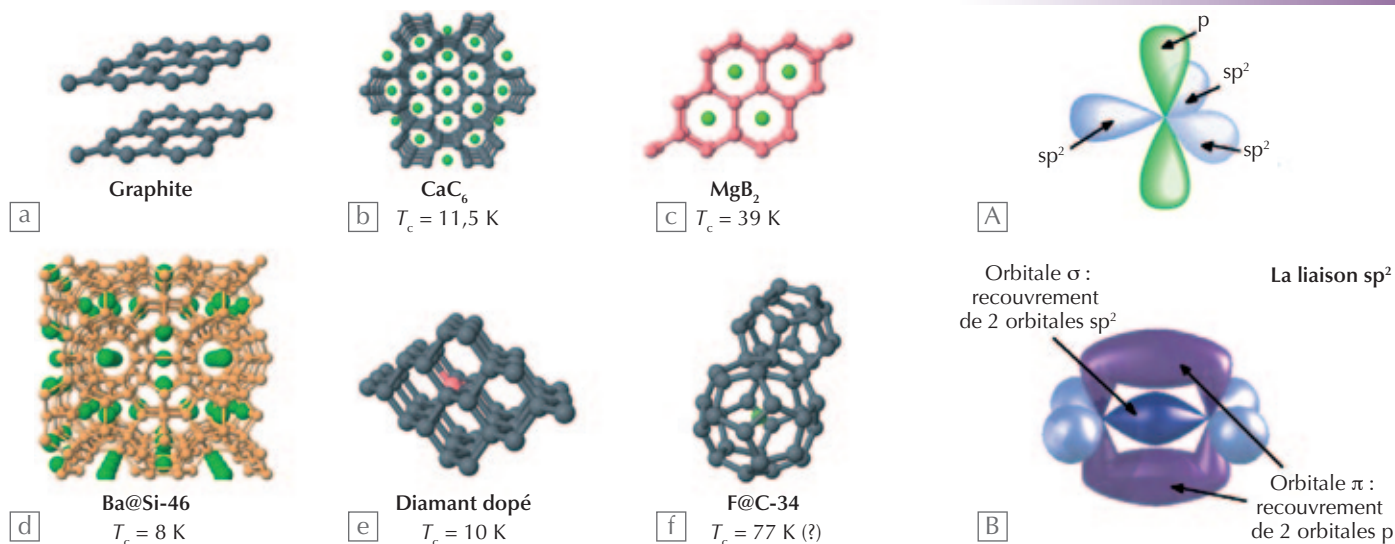
encadré 1

Dans la théorie de Bardeen, Cooper et Schrieffer (BCS) [1, 3], la température critique T_c est celle au-dessus de laquelle la densité de quasi-particules (paires de Cooper thermiquement dissociées) devient trop importante pour permettre un condensat supraconducteur stable. Si cette densité dépend de la valeur de la bande interdite supraconductrice Δ (ou *gap*), Δ est lui-même déterminé de manière auto-cohérente par la densité de quasi-particules. La température critique, $T_c = 1,13 h\nu_D \exp(-1/N(E_F)V)$, est donc celle à laquelle Δ est réduit à zéro.

L'exposant $-1/N(E_F)V$ provient de l'approximation de BCS, valable pour $N(E_F)V \ll 1$, où l'interaction électron-phonon est une constante V pour des électrons dont l'énergie est comprise dans une bande de largeur $h\nu_D$ autour de E_F , et nulle autrement. ν_D est une fréquence typique des vibrations du réseau cristallin.

Cette approximation ne se justifie pas pour les matériaux covalents, où le couplage électron-phonon λ_{el-ph} est « fort ». λ_{el-ph} est alors obtenu comme une intégrale sur les fréquences des phonons pertinents. Après insertion dans la théorie BCS, on a :

$T_c = 1,13 h\nu_D \exp[-(1+\lambda_{el-ph})/(\lambda_{el-ph}-\mu^*)]$, où μ^* est le potentiel de Coulomb « écranté ». Dans la limite de couplage faible, on retrouve $\lambda_{el-ph} \sim N(E_F)V$.

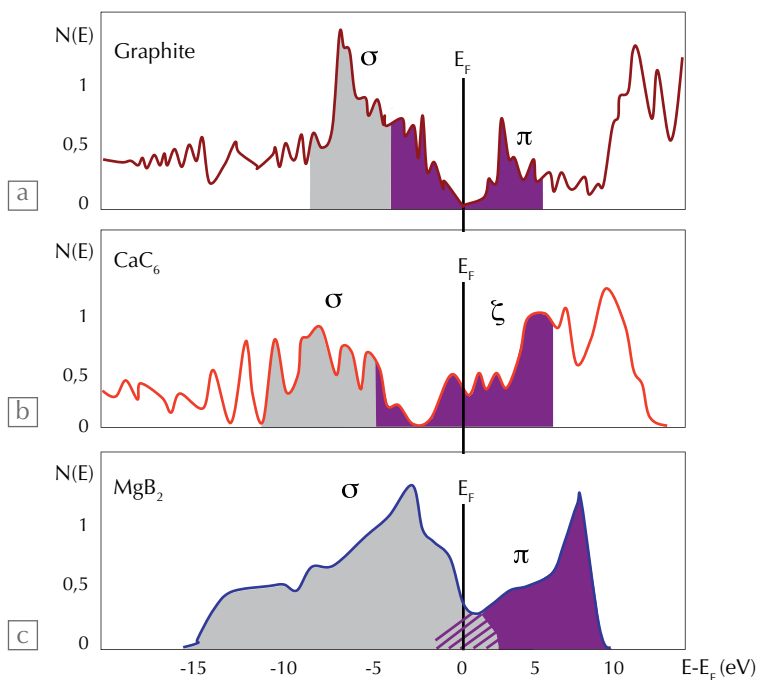


ramener le haut de la bande σ au-dessus de E_F (fig. 2c). La conduction se trouve alors assurée à la fois par la bande π et par la bande σ . Comme elles sont intimement liées à l'alignement planaire précis des atomes B (ou C), les orbitales σ sont très « sensibles » aux vibrations de ces atomes. Par conséquent, elles donnent lieu à un couplage électron-phonon λ_{el-ph} particulièrement fort et à une T_c « anormalement » élevée (encadré 1). MgB_2 est ainsi le premier exemple d'une supraconductivité « multiple », forte en ce qui concerne les électrons de la bande σ , mais faible pour les électrons de la bande π .

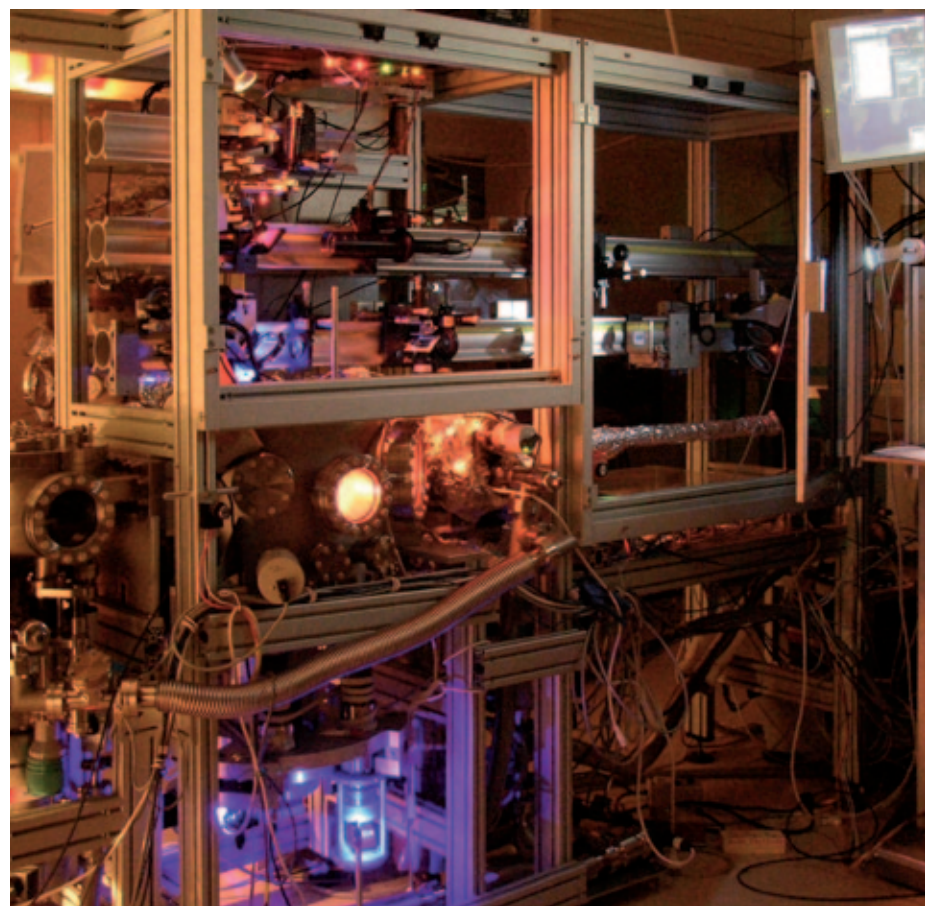
Cependant, MgB_2 n'est pas le premier exemple de système covalent supraconducteur ayant une T_c (relativement) élevée. En effet, en 1995, une température critique de l'ordre de 8 K avait été découverte dans les clathrates de silicium dopés au baryum [4]. Les clathrates sont construits à partir de cages de silicium Si_n (avec $n = 20, 24, 28$), qui partagent certaines de leurs faces (atomes marron de la figure 1d). Les atomes Si y conservent leur configuration tétraédrique sp^3 , formant des liaisons covalentes très directionnelles et localisées entre les atomes premiers voisins. C'est l'analogue en trois dimensions (sp^3) des liaisons planaires (sp^2) de MgB_2 . Dans les deux cas, les liaisons σ assurent la rigidité structurale et un couplage électron-phonon efficace. Cependant, les clathrates de silicium sont semi-conducteurs, avec une bande interdite de l'ordre de 1,8 eV. Il faut introduire des « impuretés » dans ces matériaux (les « doper ») de manière à les rendre conducteurs. C'est la structure même des clathrates qui le permet, en autorisant une *intercalation* aisée d'atomes de baryum aux centres des cages (atomes verts de la figure 1d). Ba_8Si_{46} fut ainsi le premier semi-conducteur de la colonne IV présentant une supraconductivité à plusieurs kelvins.



1. Principales structures des supraconducteurs covalents. (a) La structure graphitique du carbone est composée de feuillets hexagonaux. (b) Entre ces plans de carbone (gris) peuvent être intercalés des éléments comme Ca ou Y (verts). (c) MgB_2 a une structure cristallographique analogue, pour laquelle les plans B (roses) sont séparés par le Mg (vert) (voir aussi la figure 5, p. 8). (d) Les clathrates de Si sont des structures en cage (Si_{46} , marron), au centre desquelles sont insérés des atomes de Ba (verts). (e) Le diamant peut être dopé par substitution (par exemple au bore, atome rose) jusqu'à obtenir des alliages de type B-C pour lesquels une très forte valeur de T_c a été prédite. (f) De même, des hautes T_c ont été prédites dans les clathrates de carbone. Dans le graphite (a), la conduction électrique est assurée par les bandes π (voir schémas A et B) auxquelles s'ajoute, dans le cas du graphite intercalé (b), une conduction par la bande ζ . Dans les autres cas, les liaisons covalentes σ jouent un rôle fondamental, soit en structure planaire [sp^2 , (c)], soit en structure tridimensionnelle [sp^3 , (d-f)].



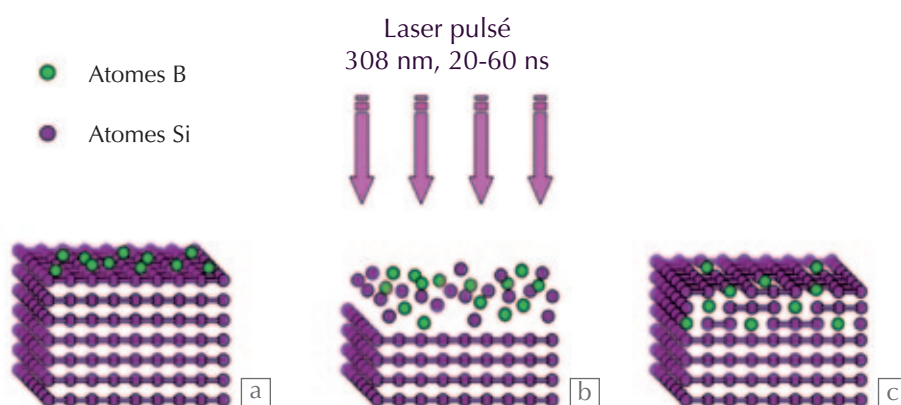
2. Densité d'états électroniques $N(E)$ en fonction de l'énergie E , pour le graphite (a), CaC_6 (b) et MgB_2 (c). Dans ce diagramme, le niveau de Fermi E_F correspond à l'énergie du dernier niveau électronique occupé à $T = 0$ K. Seuls les électrons proches de E_F contribuent aux propriétés électroniques et thermiques du solide : la densité $N(E_F)$ des états électroniques à E_F joue donc un rôle fondamental. Notamment, elle intervient directement dans le coefficient de couplage entre électrons et phonons, $\lambda_{e-ph} = N(E_F)V$, où V est un potentiel d'interaction traduisant la force du couplage. (a) Dans le graphite, les niveaux électroniques formés par les liaisons σ (en gris) se trouvent en dessous de E_F . La conductivité est déterminée par le minimum de densité d'états au milieu des niveaux π (en mauve). (b) Dans CaC_6 , l'énergie de Fermi est déplacée dans les niveaux dits ζ , hybrides entre les liaisons π du C et les niveaux du Ca. (c) Enfin, dans MgB_2 , le niveau de Fermi se trouve dans la bande σ .



3. Procédé de dopage induit par laser.

Ci-dessus : vue d'ensemble du bâti d'épitaxie laser sous ultraviolet de l'Institut d'Électronique Fondamentale d'Orsay. Courtoisie : Dominique Debarre.

Ci-dessous : principe de la technique de dépôt GILD (Gas Immersion Laser Doping), dans laquelle un gaz contenant le dopant (atomes de bore) est adsorbé sur la surface d'un substrat de silicium (a), qui est ensuite fondu par laser pendant quelques dizaines de nanosecondes (b). La recristallisation obtenue par refroidissement extrêmement rapide ($\sim 10^{10}$ K/s) permet de piéger les atomes de bore en sites substitutionnels (bien au-delà de la limite de solubilité thermodynamique de B dans Si), tout en conservant une bonne reprise d'épitaxie sur le substrat (c).



>>> Lorsque diamant et silicium deviennent supraconducteurs.

Outre sa structure de type graphite (hybridation sp^2), il est bien connu que le carbone peut cristalliser dans la structure diamant (sp^3 , fig. 1e). Le diamant et le silicium, qui ont des structures cristallo-graphiques équivalentes, sont probablement les systèmes covalents les plus connus. Le premier, car il est le prototype des isolants et le matériau le plus dur qui soit, et le second parce qu'il est le constituant principal de l'électronique moderne. Or, la question de savoir si ces composés peuvent également être supraconducteurs n'avait pas reçu de réponse jusqu'à un passé récent.

La relation empirique déjà évoquée entre covalence, rigidité, et ampleur de λ_{el-ph} entraîna la rencontre de deux communautés distinctes : celle travaillant sur les matériaux ultra-durs et celle s'intéressant à la supraconductivité.

Ainsi, au début des années 2000, le diagramme de phases ternaire C:B:N faisait l'objet de nombreuses études visant à élaborer des systèmes de très haute dureté. En 2004, deux groupes réussirent à synthétiser sous haute pression des carbures de bore avec, *en sous-produit*, du diamant contenant environ 2 à 3% (atomiques) de bore (en substitution sur les sites du C), un taux de dopage suffisant pour rendre le diamant conducteur. Ces travaux établirent que, lorsqu'il devient métallique, le diamant dopé est également *supraconducteur* en dessous de 4 K [5]. Aujourd'hui, du diamant supraconducteur polycristallin, monocristallin et même nanocristallin a été obtenu sous haute pression, ou par des techniques de dépôt en phase vapeur. La température critique a été poussée jusqu'à environ 10 K.

En 2006, un groupe français a montré [6] que le silicium pouvait, lui aussi, devenir supraconducteur (avec une T_c maximale de l'ordre de 1 K), lorsqu'il contient environ 2 à 8% de bore. Or, ce taux de dopage se situe bien au-delà de la limite de solubilité du bore dans le silicium. Il ne peut être atteint que grâce à des techniques de croissance hors équilibre, comme celle de "Gas Immersion Laser Doping", qui est décrite dans la figure 3.

Plus récemment, on a découvert que le carbure de silicium SiC et le germanium deviennent eux aussi supraconducteurs (avec des $T_c \sim 1$ K), lorsqu'ils sont respectivement dopés au bore et au gallium.

Doper un isolant jusqu'à ce qu'il devienne métallique semble une façon peu directe pour fabriquer un bon supraconducteur. Comme mentionné dans l'introduction, le principal attrait des systèmes covalents est le grand $\lambda_{\text{el-ph}}$, proportionnel au produit $N(E_F)V$. De ce point de vue, le diamant dopé est exceptionnel : le potentiel attractif entre électrons, V , est 50% plus élevé que dans MgB_2 . Il est donc surprenant que la température critique la plus élevée mesurée dans le diamant (~ 10 K), soit nettement plus faible que celle de MgB_2 . Cela provient des valeurs très différentes des densités d'états électroniques au niveau de Fermi, $N(E_F)$, et donc des taux très différents d'électrons participant à la supraconductivité. Si, en dimension deux, $N(E_F)$ est indépendante de la densité électronique n , elle croît comme $\sim n^{1/3}$ en dimension trois. $N(E_F)$ est donc élevée dans le composé lamellaire MgB_2 , mais modeste dans les matériaux tridimensionnels pour des taux de dopage pertinents. Les calculs *ab initio* [7] réalisés pour le carbone, le silicium et le carbure de silicium dopés avec quelques pourcents de bore, montrent que ces matériaux ont en effet des valeurs de $\lambda_{\text{e-ph}}$ comprises entre 0,3 et 0,5 (au lieu de ~ 1 dans MgB_2), ce qui conduit à des températures critiques de quelques kelvins, en bon accord avec les résultats expérimentaux.

Vers de nouveaux systèmes à haute température critique ?

Si l'on s'inspire de la théorie de BCS (encadré 1), une grande valeur de $\lambda_{\text{e-ph}}$ (et donc de T_c) requiert des matériaux mariant une forte densité d'états $N(E_F)$ avec un bon potentiel d'interaction V . On rappelle que V augmente lorsque la masse de l'atome diminue (si l'on passe du silicium au carbone, par exemple), car les fréquences typiques des phonons sont alors plus élevées. De plus, des calculs ont montré que V est plus important pour une hybridation de type sp^3 (plutôt que sp^2). La limitation des composés supraconducteurs covalents tridimensionnels est donc la faible valeur de $N(E_F)$.

En ce qui concerne le diamant, des travaux pour accroître $N(E_F)$ sont en cours, soit en optimisant le processus de dopage chimique, soit en utilisant d'autres modes d'injection des porteurs [8]. Cependant, les expériences montrent que le lien entre la concentration de bore et la température critique n'est pas

trivial (encadré 2, p. 8). Au-delà de quelques pourcents de bore, T_c sature, probablement du fait de l'aggrégation du bore en paires électriquement inactives ou à son incorporation sur des sites interstitiels.

De nombreuses pistes restent à explorer. Par exemple, il a été prédit que BC_5 en structure cubique aurait une T_c équivalente à celle de MgB_2 . Cette structure a été synthétisée à haute pression et haute température, mais la nature nanocristalline du matériau obtenu n'a pas permis la mesure d'éventuelles propriétés supraconductrices.

D'autres pistes vers les hautes T_c sont les matériaux avec une structure en « cage », comme les fullerènes de carbone dopés en métaux alcalins. En effet, les « boules » de C_{60} se répartissent sur un réseau cubique pour former un « cristal moléculaire » ayant des bandes d'énergie très étroites, associées à de fortes densités d'états^(a). Dans le fullerène C_{60} non dopé, ces bandes sont soit vides, soit totalement remplies : le solide est isolant. Le dopage peut être effectué en intercalant des éléments alcalins dans les cavités laissées libres entre les boules, ce qui conduit à une T_c de l'ordre de 30 K. Si l'on « profite » ici pleinement des fortes valeurs de la densité d'états, des études théoriques ont montré qu'il reste pas mal de choses à faire du côté du potentiel V . Dans C_{60} , les liaisons sont principalement de type sp^2 , mais V augmente rapidement quand on passe de C_{60} à C_{20} ^(b).

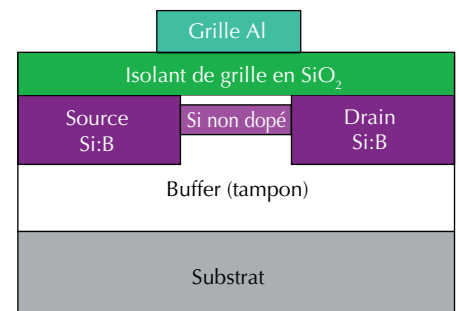
Les clathrates de silicium, déjà mentionnés en introduction, constituent d'autres exemples de structures en cage, dans lesquelles, contrairement aux fullerènes, les atomes ont chacun quatre premiers voisins et toutes les liaisons de type sp^3 sont satisfaites. Les bandes électroniques sont plus étroites que dans le diamant, et donnent donc lieu à de fortes densités d'états. Enfin, leur structure permet des taux de dopage élevés, ainsi qu'une grande flexibilité dans le choix du dopant. En particulier, dans le clathrate dopé au baryum noté $\text{Ba}_8@\text{Si}_{46}$ (fig. 1d), on obtient une T_c d'environ 8 K, à comparer à 0,6 K observé dans le silicium cubique dopé au bore. Malheureusement, les fréquences typiques des phonons, et donc T_c , sont ici limitées par la masse élevée des atomes de Si. Malgré des prédictions théoriques encourageantes et de nombreuses tentatives, aucun clathrate de carbone (fig. 1f) n'a été synthétisé à ce jour.

Terminons par les composés de structure graphitique [9], comme CaC_6 ou YbC_6 (fig. 1b). Si le niveau de Fermi ne se situe pas dans la bande σ , l'hybridation entre les niveaux électroniques π du carbone et ceux de l'intercalant (Ca ou Yb), regroupés sous le terme de « bande ζ » (fig. 2b), conduit à une T_c relativement élevée (jusqu'à 11,5 K). Il est alors tentant de chercher des matériaux pour lesquels le niveau de Fermi croise à la fois la bande σ et la bande ζ . Des valeurs de T_c atteignant 150 K ont ainsi été prédites pour Li_xBC_8 ($x < 1$), mais n'ont pas été observées à ce jour.

Applications potentielles

Le silicium dopé au bore jouera peut-être un rôle important dans le développement de dispositifs à base de jonctions supraconducteur-normal-supraconducteur (SNS). Quand la région normale (N) est un semi-conducteur, le fort désaccord entre les densités électroniques conduit à une discontinuité du potentiel chimique dans la jonction. Cette discontinuité se traduit par une barrière dite « de Schottky », qui limite considérablement le transfert des paires de Cooper à travers la jonction, et donc la fonctionnalité de tels dispositifs. La supraconductivité du silicium « ultra-dopé » rendrait possible la fabrication des deux régions à partir du même matériau, en changeant simplement le niveau de dopage. On éviterait ainsi les barrières de Schottky à l'interface. Dès lors, le contrôle du courant traversant la jonction par la grille capacitive influant sur la densité électronique dans la partie normale devient possible, ce qui ouvrirait la voie à la fabrication du transistor Josephson à effet de champ (JOFET, voir figure 4).

»»»



4. Transistor Josephson à effet de champ (JOFET). L'utilisation d'un même matériau pouvant être rendu soit supraconducteur soit isolant, par dopage, et l'application d'une tension de grille simplifieraient beaucoup la conception de ce genre de dispositif.



La découverte de la supraconductivité du silicium, du SiC et du diamant dopés ouvre également maintes possibilités pour la conception de dispositifs électromécaniques de taille nanométrique pour la détection de forces, masses, charges ou déplacements, avec une résolution telle que l'on pourrait mesurer la quantification de ces grandeurs. L'absence de dissipation électrique (sans couche métallique supplémentaire à déposer sur le résonateur) augmente le facteur de qualité et la sensibilité du système. De nouveaux effets pourraient être observés, qui proviendraient de la nature cohérente de la supraconductivité.

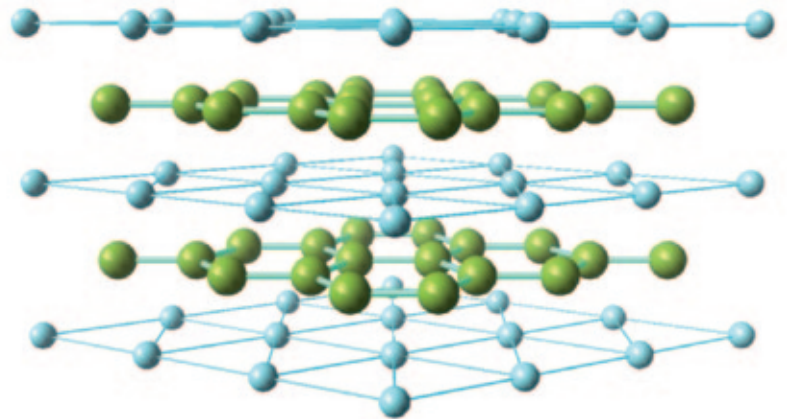
En particulier, les extraordinaires propriétés physiques, électroniques et thermiques du diamant en font un matériau unique pour le développement de nanosystèmes électromécaniques. Son module de Young inégalé permettra de réaliser des poutres ayant des fréquences de résonance ν bien plus élevées (GHz) que celles des résonateurs actuels, rendant la limite quantique accessible à des températures envisageables ($\sim 40 \text{ mK} < h\nu/k_B$). La poutre peut être excitée en faisant circuler un courant en présence d'un champ magnétique – la force de Lorentz conduit alors à l'oscillation du dispositif. La T_c et le champ critique supérieur [3] de l'ordre de quelques teslas, tous deux supérieurs à ceux des supraconducteurs habituellement utilisés, permettront de travailler à des champs magnétiques élevés, où le couplage électromécanique est plus fort.

Conclusion

En conclusion, bien que le mécanisme d'appariement semble conventionnel, c'est-à-dire décrit par l'interaction électron-phonon dans le cadre de la théorie BCS, la supraconductivité induite par dopage dans les semi-conducteurs covalents est un développement inattendu et prometteur pour la recherche actuelle et future. ■

(a) Toutes les bandes électroniques contiennent le même nombre d'états. Donc, plus une bande est étroite en énergie – on dit qu'elle est moins dispersive – plus la densité d'états devient grande.

(b) C'est-à-dire, lorsque l'on augmente le caractère sp^3 de l'hybridation du carbone. De même, il est possible d'augmenter V dans les nanotubes de carbone en les confinant dans des canaux de zéolite. V croît alors lorsque le diamètre se réduit, entraînant une augmentation de T_c jusqu'à 14 K pour des tubes de 0,4 nm.



© CNS Photonique / Julien BOBROFF.

5. Structure cristallographique du diborure de magnésium MgB_2 . Les atomes de bore sont en vert, ceux de magnésium en bleu.

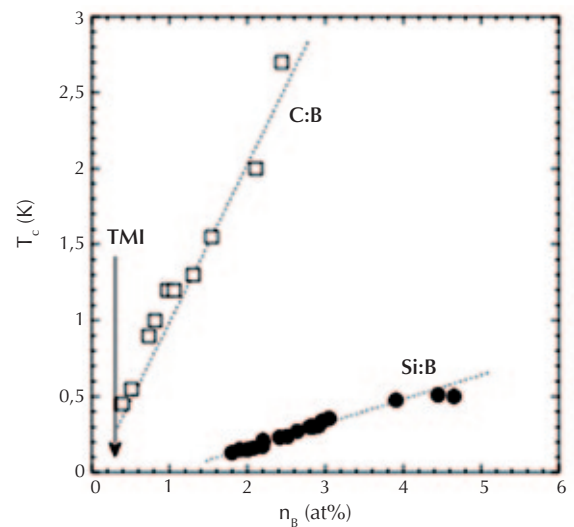
► Des électrons proches de la localisation

encadré 2

Un aspect fondamental des semi-conducteurs supraconducteurs est leur faible densité de porteurs. De ce fait, ces systèmes sont proches d'une *transition métal-isolant* (TMI). À ceci s'ajoute l'effet du désordre inhérent au dopage, notamment le piégeage d'électrons dans des états localisés, néfaste pour la supraconductivité. Néanmoins, dans le diamant dopé, T_c reste *anormalement* élevée lorsque l'on se rapproche de la TMI [10] (fig. 6), alors que la théorie BCS prévoit qu'elle décroît exponentiellement lorsque $\lambda_{e-ph} \sim N(E_F)V$ tend vers zéro.

La situation est *a priori* plus simple dans le cas du silicium dopé, pour lequel la supraconductivité est obtenue pour des taux de dopage de l'ordre de 2% à 5%, bien supérieurs à la valeur correspondant à la TMI ($\sim 0,01\%$). Or, les calculs *ab initio* [8] de λ_{e-ph} suggèrent là aussi une variation très rapide de T_c en fonction du dopage, tandis que les expériences montrent encore une fois une décroissance « lente » de T_c .

Le rôle du désordre reste donc à élucider.



6. Évolution de la température critique (T_c) en fonction du taux de dopage en bore (n_B) dans le diamant (C:B) et le silicium (Si:B).

Références

- 1• P. Nozières, *Reflète de la Physique* **7** (2007), p. 14.
- 2• X. Blase, É. Bustarret, C. Chapelier, T. Klein et C. Marcat, *Nature Materials*, **8** (2009), p. 275 et références incluses.
- 3• K. van der Beek, *Reflète de la Physique* **27** (2011), p. 6.
- 4• H. Kawaji *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **74** (1995) 1427 ; D. Connétable *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **91** (2003) 247001.
- 5• E.A. Ekimov *et al.*, *Nature* **428** (2004) 542 ; É. Bustarret *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **93** (2004) 237005.
- 6• É. Bustarret *et al.*, *Nature* **444** (2006) 465.
- 7• L. Boeri *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **93** (2004) 237002 ; K.W. Lee *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **93** (2004) 237003 ; X. Blase *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **93** (2004) 237004.
- 8• W.E. Pickett, *Physica C* **468** (2008) 126 ; J.E. Moussa et M.L. Cohen, *Phys. Rev. B* **77** (2008) 064518 ; M. Calandra et F. Mauri, *Phys. Rev. Lett.* **101** (2008) 016401.
- 9• T.E. Weller *et al.*, *Nature Phys.* **1** (2005) 39.
- 10• T. Klein *et al.*, *Phys. Rev. B* **75** (2007) 165313 ; C. Marcat *et al.*, *Phys. Rev. B* **81** (2010) 020501(R).

Ruptures, les matériaux roulent des mécaniques

Du 12 février 2013 au 10 novembre 2013

Exposition ouverte du mardi au samedi de 9h30 à 18h,
et le dimanche de 10h à 19h.



Forces et contraintes, Chocs et rebonds, Trancher, casser, broyer ou encore Plisser, froisser... Pas moins de seize thématiques abordent les contraintes et les déformations en tous genres que peuvent être amenés à subir les matériaux qui nous entourent.

Alors, comment les matériaux roulent-ils des mécaniques et surtout, comment découvrir leur point de rupture ? En s'essayant à une cinquantaine d'expériences, les visiteurs pénètrent au cœur de la matière et testent la résistance de divers éléments.

Initialement conçue et réalisée par Centre•Sciences, le CCSTI de la région Centre-Orléans, l'exposition **Ruptures** a été adaptée à son lieu d'accueil parisien et enrichie de dispositifs de médiation humaine, chers au Palais de la découverte. Animations et expériences étonnantes y sont proposées chaque jour, au Bar des manips', par des médiateurs scientifiques spécialisés en chimie et en physique, mais aussi en sciences de la Terre et en mathématiques. Une approche pédagogique qui facilite la rencontre du grand public, à partir de 10 ans, avec la science des matériaux.

Palais de la découverte

Avenue Franklin Delano Roosevelt, 75008 Paris
www.palais-decouverte.fr

Société Française Neutronique

21^{èmes} Journées de la Diffusion Neutronique du 21 au 27 juin 2013
Sète, Languedoc-Roussillon

JDN21

Ecole thématique : Neutrons et Matériaux pour l'Energie
21-25 juin 2013

Rencontres Rossat-Mignod et Prix de thèse SFN 2013
25-27 juin 2013

Dates limites :
4 mars 2013 : candidature au prix de thèse SFN
3 avril 2013 : soumission des résumés pour contributions orales
15 mai 2013 : inscription à l'école et aux rencontres

Organisation : jdn21@univ-montp2.fr
Werner Pauk, Monica Ceretti, Romain Viennois, Jérôme Rouquette, Julian Haines, Philippe Papet (Université Montpellier 2, CNRS)
Marie-Hélène Mathon (LLB, Saclay)
Clemens Ritter (ILL, Grenoble)

<http://www.sfn.asso.fr/JDN/JDN21>

Paris, France September 9-13, 2013

Convention Centre

www.ivc19.com
www.icnt2013.com
contact@ivc19.com

**IVC-19
ICN+T 2013
ICSS-15
ITFPC 2013
MATEC 2013
CIP 2013
RSD 2013**

PARIS - SEPTEMBER 9-13, 2013

- 19th International Vacuum Congress (IVC-19)
- International Conference on Nanoscience and Technology (ICN+T 2013)
- 15th International Conference on Solid Surfaces (ICSS-15)
- Innovations in Thin Film Processing and Characterisation (ITFPC 2013)
- Magnetron, Ion processing & Arc Technologies European Conference (MATEC 2013)
- 19th International Colloquium on Plasma Processes (CIP 2013)
- 12th International Conference on Reactive Sputter Deposition (RSD 2013)

CONFERENCE TOPICS:
T01 Applied Surface Science
T02 Astronomical Frontiers for Surface Science
T03 Biointerfaces
T04 Cultural Heritage
T05 Electronic Materials and Processes
T06 Energy and sustainable development
T07 Frontiers in Photoelectron Full-field Imaging and Spectromicroscopy
T08 Functional Molecules and Molecular Machines
T09 Ionic liquids surfaces and interfaces
T10 Nanoscience and Technology
T11 Plasma Science and Technology
T12 Surface Engineering
T13 Surface Science
T14 Thin Films
T15 Vacuum Science and Technology

Conference 9-13 September
Exhibition 10-12 September
Registration on www.ivc19.com

Jointly organized by: Belgian Vacuum Society (BEVAC), British Vacuum Council (BVC), Canadian Vacuum Society (CIVS), Czech Vacuum Society (CZVS), French Vacuum Society (SFA), Hungarian Vacuum Society (HVS), Portuguese Vacuum Society (SOPORVAC), Slovak Vacuum Society (SVS), Slovenian Vacuum Society (SVTS)

La genèse de l'atome de Bohr

Bernard Pourprix (bernard.pourprix@univ-lille1.fr)

CHSE Université Lille 1, UMR « Savoirs, textes, langage », 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex

Le but de cet article est de présenter le cheminement de la pensée de Bohr au cours de l'élaboration de son modèle d'atome, vers 1912-1913.

En nous appuyant sur des documents originaux, nous montrons que, contrairement à une opinion répandue, la théorie atomique de Bohr n'est pas, à l'origine, une théorie des spectres atomiques, mais une théorie de la constitution des atomes.

Nous dégageons ce qui la rattache à la théorie du rayonnement de Planck et fait d'elle une partie intégrante de la théorie quantique en construction.

La théorie quantique a pour origine l'étude du rayonnement thermique du corps noir. En 1900, quand il établit théoriquement la loi du rayonnement, Max Planck arrive à la conclusion que l'énergie échangée entre les oscillateurs atomiques d'une enceinte et le rayonnement électromagnétique de fréquence ν qu'elle contient ne peut prendre que des valeurs multiples d'une quantité élémentaire $h\nu$ (h constante de Planck). Pourtant, il n'a pas conscience d'introduire ce qui deviendra la « discontinuité quantique ». C'est après coup qu'il se convertit progressivement aux idées quantiques, et c'est seulement vers 1910 qu'il propose une théorie du rayonnement tout à fait différente de la théorie électromagnétique classique (encadré 1).

L'atome entre réellement en scène au début des années 1910. Niels Bohr, préoccupé par la question de la stabilité de la matière, imagine d'appliquer l'idée des quanta à l'atome planétaire de Rutherford. Il suppose que les électrons décrivent certaines orbites bien déterminées. Il introduit alors la notion d'états stationnaires, états dans lesquels l'atome, contrairement aux lois de l'électromagnétisme, ne rayonne pas d'énergie. Il interprète l'émission de lumière par les systèmes atomiques comme due aux passages des atomes d'un état stationnaire à un autre (les électrons sautent d'une orbite à une autre). La différence d'énergie entre les deux états détermine la valeur du quantum d'énergie rayonnée, conformément à la relation $W_2 - W_1 = h\nu$. La théorie de Bohr, *On the constitution of atoms and molecules*, est publiée en 1913 sous la forme de trois articles, rassemblés par la suite (encadré 2).

Cette théorie s'avère extrêmement féconde. Non seulement elle permet d'interpréter de nouveaux phénomènes (effet Stark, expérience de Franck et Hertz, etc.), mais elle se prête à d'importantes extensions (par exemple, la théorie quantique du rayonnement élaborée par Einstein en 1916).

Pourtant, en raison de sa nature ambiguë, à la fois quantique et classique, elle paraît bien déconcertante. Ce qui est peut-être le plus choquant, pour un physicien classique, c'est que l'émission de lumière est liée, non pas au mouvement de l'électron sur son orbite, mais à son passage sur une autre orbite.

Bohr reste obsédé par la question du rapport entre les descriptions classique et quantique des processus atomiques. Conscient que son travail a l'aspect d'un bricolage désordonné, il entreprend la construction d'une véritable théorie de l'atome formant un tout cohérent. Dans son mémoire en trois volumes publiés de 1918 à 1922, *On the quantum theory of line spectra*, il pose le principe d'une correspondance générale entre les descriptions classique et quantique, et il en développe toutes les implications. Son fameux « principe de correspondance » trouve sa source dans la remarque que les résultats prévus par l'électrodynamique classique doivent conserver leur validité dans le cas limite des fréquences suffisamment petites. C'est en s'appuyant sur ce principe que H. A. Kramers et W. Heisenberg, en 1924-1925, fournissent une interprétation des phénomènes de dispersion et de diffusion de la lumière par la matière. Leur travail a une portée considérable : il constitue l'ébauche de la mécanique quantique matricielle, une théorie qui n'a plus grand-chose à voir avec celle que Bohr a conçue à l'origine.

C'est cette théorie primitive que notre article essaie de reconstituer. Nous nous attachons tout particulièrement à découvrir la clef qui permet à Bohr d'accéder à sa théorie de l'atome. Arnold Sommerfeld a prétendu que Bohr, dans l'intention de démontrer la formule de Balmer du spectre de l'atome d'hydrogène, a eu l'idée de quantifier le moment angulaire orbital de l'électron. Cette opinion a prévalu jusqu'à



Niels Bohr (à gauche) et Albert Einstein. Photo prise à Leiden par Paul Ehrenfest (1880-1933), probablement en décembre 1925.

nos jours chez les physiciens. Elle nous paraît pourtant discutable, dans la mesure où elle ne prend pas en considération l'intention et la démarche réelles du chercheur. En effet, les tout premiers travaux de Bohr n'ont rien à voir avec la spectroscopie. À l'origine, Bohr cherche à comprendre la constitution et les propriétés chimiques des atomes. Il s'intéresse à la (re)formation des atomes après ionisation. Le rayonnement d'énergie produit durant ce processus lui semble comparable à celui que Planck vient de théoriser ; aussi le but principal de notre article est-il d'étudier le rôle qu'a joué l'analogie avec l'oscillateur de Planck dans la genèse de l'atome de Bohr (encadré 1).

Comment assurer la stabilité de l'atome de Rutherford

Après avoir soutenu à Copenhague, en 1911, une thèse de doctorat sur la théorie électronique des métaux, Bohr effectue un séjour de six mois à Cambridge au laboratoire de J. J. Thomson. Puis, en mars 1912, il entre au laboratoire de Rutherford à Manchester. Il y mène de front des activités expérimentales sur la diffusion

et l'absorption des particules α par la matière, et des élaborations théoriques. Il adopte le modèle atomique de Rutherford, dont il perçoit tout de suite la portée très étendue, mais il doit faire face à une grande difficulté. En effet, ce modèle présente l'inconvénient d'une instabilité mécanique (en plus de son instabilité radiative), ce qui est en contradiction flagrante avec l'évidence empirique de la stabilité des structures atomiques.

»»»

► La théorie de Planck du rayonnement vers 1912

encadré 1

Dans sa première théorie du rayonnement, en 1900, Planck n'abordait pas la question du mécanisme de l'émission. S'il y fait allusion en 1906 dans ses *Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung*, ce n'est pas avant 1910-1912 qu'il traite cette question en détail. Dans un premier article ("Zur Theorie der Wärmestrahlung", *Annalen der Physik*, **31** (1910) 758-768), sans donner de formulation mathématique, il propose de modifier l'équation d'un oscillateur de fréquence ν de telle sorte que son énergie puisse varier seulement par valeurs discrètes, multiples de $h\nu$.

Cependant, Planck n'arrive pas à construire une théorie du rayonnement satisfaisante. Les hypothèses à partir desquelles sont obtenues d'un côté, l'expression de l'énergie moyenne d'un oscillateur et, de l'autre, celle de la densité de rayonnement, se contredisent. Pour obtenir la première, il suppose que l'énergie d'un oscillateur est un multiple de $h\nu$, tandis que les raisonnements qui conduisent à la seconde supposent cette énergie continûment variable. Face à ces difficultés, Planck estime inévitable de renoncer à l'hypothèse que l'énergie d'un oscillateur est nécessairement un multiple de $h\nu$ et d'admettre que le phénomène d'absorption du rayonnement libre est essentiellement continu.

Dans un deuxième article ("Eine neue Strahlungshypothese", *Verhandlungen der deutschen physikalischen Gesellschaft*, **13** (1911) 138-148), il propose de maintenir la théorie classique de l'absorption et de reléguer les quanta dans le mécanisme de l'émission. Il écrit l'énergie d'un oscillateur sous la forme $E = nh\nu + \rho$: l'oscillateur possède n quanta et un reste $\rho < h\nu$. Le rayonnement est supposé émis indépendamment de l'oscillation, l'émission d'un quantum $h\nu$ est considérée comme un processus instantané et statistique. Le nombre entier n est seul soumis à une loi de probabilité, tandis que ρ augmente continûment en fonction du temps. À partir de là, le traitement est semblable à celui proposé en 1900, et il débouche sur la même formule du rayonnement.

Quelques mois plus tard, Planck modifie encore sa théorie ("Ueber die Begründung des Gesetzes der schwarzen Strahlung", *Annalen der Physik*, **37** (1912) 642-656). Il suppose cette fois que, lors d'une émission, tous les multiples de $h\nu$ sont également probables (au lieu d'un seul quantum émis dans la théorie précédente). Plus précisément, l'oscillateur émet instantanément la totalité de son énergie lorsque sa valeur a atteint un multiple n de $h\nu$. La valeur moyenne de son énergie cinétique, comme celle de son énergie potentielle, est alors $nh\nu/2$.

Puisque la quantification est limitée au seul processus d'émission, l'oscillateur de Planck peut posséder toutes les énergies permises classiquement. Cette idée, Bohr ne peut l'accepter, car elle est incompatible avec son projet d'utiliser le quantum de Planck pour expliquer la stabilité de l'atome et sélectionner les états stationnaires. C'est pourquoi il oublie la notion d'absorption continue et retient seulement la quantification de l'énergie émise : « Le point essentiel dans la théorie de Planck est que le rayonnement d'énergie par un système atomique n'a pas lieu de manière continue comme le suppose l'électrodynamique ordinaire ; il se produit dans des émissions distinctement séparées, la quantité d'énergie rayonnée par un vibreur de fréquence ν dans une seule émission étant égale à $nh\nu$. » (I, p. 4) .



Ayant retourné le problème dans tous les sens, Bohr acquiert la conviction que la clef de l'énigme de la stabilité des orbites électroniques ne se trouve pas dans la mécanique classique. Avant de quitter Manchester, il consigne ses réflexions dans un mémorandum. Il note d'abord que l'atome de Rutherford est bien plus intéressant que celui de Thomson, car il permet d'expliquer de manière plus satisfaisante, non seulement le grand angle de diffusion des particules α , mais aussi la loi périodique des propriétés chimiques des éléments. Puis Bohr exprime sa conviction que, pour toute orbite électronique existant dans un atome à l'état naturel, il y a un rapport défini entre l'énergie cinétique T de l'électron et sa fréquence de révolution f ($T = Kf$, K étant une constante). « Cette hypothèse, pour laquelle je n'essaierai pas de donner un fondement mécanique (cela semble sans espoir), est choisie comme la seule qui semble offrir une possibilité d'explication de l'ensemble des résultats expérimentaux, qui rassemble et semble confirmer les conceptions du mécanisme de rayonnement comme celles proposées par Planck et Einstein. »

Bien que Bohr ne mentionne pas explicitement le quantum d'action, il a pleinement pris conscience que celui-ci doit être l'élément stabilisant de la structure atomique, et que le rapport T/f est étroitement relié à la constante de Planck. Il est convaincu, depuis son étude du comportement des électrons dans les métaux, que la validité de l'électrodynamique classique est sujette à une limitation fondamentale dans le domaine atomique, et il ne doute pas que cette limitation est, d'une manière ou d'une autre, gouvernée par le quantum d'action. Cependant, quand il écrit son mémorandum, il ne sait pas du tout comment déterminer la valeur de K . La première quantification de l'atome de Bohr reste donc indéterminée.

Bohr en vient à s'intéresser aux raies spectrales

Après quatre mois passés à Manchester, Bohr rentre à Copenhague. Fin 1912, il tombe sur les articles que J. W. Nicholson a publiés depuis peu. L'astrophysicien d'Oxford s'est intéressé aux spectres des nébuleuses stellaires et de la couronne solaire. Après avoir exprimé l'énergie d'un anneau d'électrons tournant autour d'un noyau positif, en fonction du rayon de l'anneau et de la fréquence orbitale, il a déterminé celle-ci dans le cas du gaz

neutre qu'il appelle « protofluorine », un gaz hypothétique présent dans la couronne solaire. Pour ce faire, il a admis que les raies observées correspondent aux fréquences de vibration transversale des électrons perturbés autour de leur orbite d'équilibre, conformément à la conception classique du rayonnement, selon laquelle chaque fréquence optique rayonnée correspond à une fréquence de résonance mécanique de l'atome. Nicholson obtient ainsi la valeur numérique du rapport entre l'énergie d'un électron et sa fréquence orbitale, soit $25h$. Les mêmes calculs effectués pour l'atome de « protofluorine » ionisé simplement et doublement donnent respectivement $22h$ et $18h$. Les calculs de Nicholson rendent compte avec une bonne précision de plusieurs raies déjà observées mais non identifiées, ils permettent même d'en découvrir une nouvelle.

Bohr est à la fois impressionné et embarrassé par ce qu'il vient de lire. Entre Nicholson et lui, il voit des ressemblances, mais aussi une différence : le système qu'il (Bohr) considère est celui pour la formation duquel la plus grande énergie possible est rayonnée, c'est-à-dire l'atome dans son état permanent. Le 31 janvier 1913, il s'en ouvre à Rutherford :

« Dans ses calculs, Nicholson traite, comme moi, de systèmes ayant la même constitution que votre modèle d'atome ; et, en déterminant les dimensions et l'énergie des systèmes, il cherche, comme moi, à prendre appui sur la relation entre l'énergie et la fréquence, suggérée par la théorie de Planck du rayonnement. Cependant, l'état des systèmes considérés dans mes calculs est, de tous les états conformes à cette relation, celui pour lequel les systèmes possèdent la plus petite quantité d'énergie possible, c'est-à-dire celui pour la formation duquel la plus grande quantité possible d'énergie est rayonnée. »

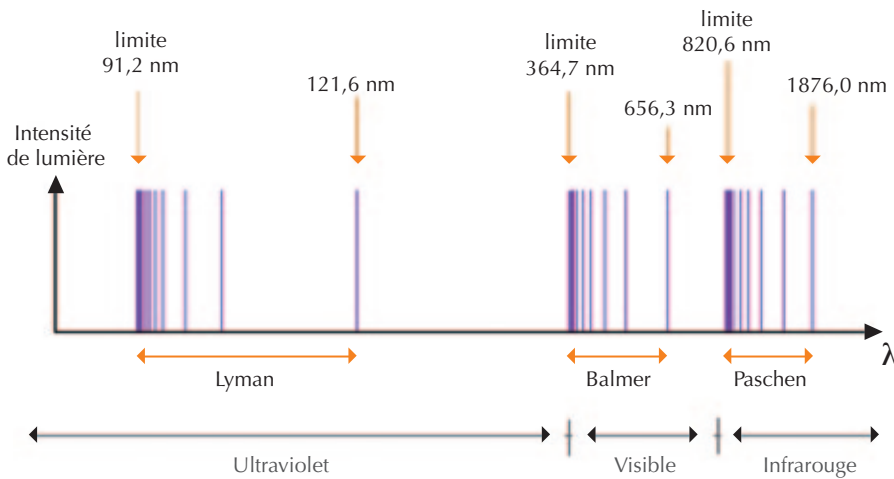
Il me semble donc raisonnable de supposer que l'état des systèmes considérés dans mes calculs doit être identifié à celui des atomes dans leur état permanent (ou naturel). (...) Les états des systèmes considérés par Nicholson sont, au contraire, moins stables ; ce sont des états par lesquels passent les atomes lors de leur formation, et dans lesquels l'énergie correspondant aux raies spectrales caractéristiques de l'élément est rayonnée. Ils sont présents en quantité sensible seulement là où les atomes sont continuellement brisés et reformés, i. e. dans des endroits tels que les tubes à vide excités ou les nébuleuses stellaires. »

Bohr estime, finalement, que son atome n'est pas incompatible avec celui de Nicholson, moyennant quelques modifi-

cations, notamment l'introduction des états excités. Mais il s'empresse d'ajouter : « Quant à moi, je ne traite pas du tout de la question du calcul des fréquences correspondant aux raies dans le spectre visible. » D'ailleurs, les raies spectrales lui paraissent trop compliquées pour fournir la clef de la structure de l'atome et des systèmes atomiques. Dans une lettre à G. Hevesy datée du 7 février 1913, il écrit que sa théorie suppose que « l'énergie émise par rayonnement lors de la liaison d'un électron (initialement au repos par rapport au noyau) est égale à la constante de Planck multipliée par la fréquence de rotation de l'électron sur son orbite finale », affirmation aussitôt corrigée par une note : « La constante entrant dans les calculs n'est pas exactement égale à la constante de Planck, mais elle en diffère par un facteur numérique, comme prévu par des considérations théoriques. »

Dans le courant du mois de février, Bohr découvre le travail de J. R. Rydberg sur la classification des raies spectrales de l'hydrogène (fig. 1). C'est H. M. Hansen, un jeune physicien de Copenhague, qui attire son attention sur la grande simplicité avec laquelle ces raies ont été représentées par Rydberg. Hansen lui demande si sa théorie peut rendre compte des régularités spectrales, et notamment de la formule de Balmer, $\sigma = R [(1/2^2) - (1/n^2)]$ (σ est le nombre d'onde, défini par le rapport v/c entre la fréquence du rayonnement et la vitesse de la lumière, R est la constante de Rydberg et n un entier). Bohr, qui ne s'est pas encore intéressé à cette question, prend alors conscience que sa théorie serait susceptible d'expliquer la structure de cette formule, à condition d'admettre d'autres états que les deux seuls, permanent et ionisé, qu'il a considérés jusqu'alors. La formule de Balmer pourrait donc servir de support empirique solide pour ses premières considérations sur l'atome.

« Aussitôt que je vis la formule de Balmer, toute la chose fut immédiatement claire pour moi », répétera souvent Bohr, notamment à son ami et disciple Léon Rosenfeld. Que veut-il dire ? Que la formule de Balmer est la clef de sa toute première théorie de l'atome ? Certainement pas : début février 1913, avant même de prendre connaissance de cette formule, il a quasiment atteint son objectif, c'est-à-dire l'esquisse d'une théorie de la constitution de l'atome, basée sur la considération du processus de liaison des électrons avec le noyau. Dans cette perspective, il considère sa prise en compte de la formule de Balmer comme une simple



1. Spectre schématisé d'émission de l'atome d'hydrogène en fonction de la longueur d'onde.

Les raies de la série de Balmer se situent dans le domaine visible, et correspondent aux transitions d'un niveau $n > 2$ vers le niveau $n = 2$; les longueurs d'onde correspondantes obéissent à la formule de Balmer.

extension de sa théorie. Dans une lettre à Rutherford du 6 mars 1913, il affirme pouvoir donner une interprétation simple du spectre de l'atome d'hydrogène. Il est satisfait : le résultat de son calcul est en bon accord avec l'expérience, la formule de Balmer confirme sa théorie.

D'une analogie étroite avec la théorie de l'oscillateur de Planck...

Le travail annoncé à Rutherford le 6 mars est publié en trois parties. La partie I enracine l'atome de Bohr dans la théorie quantique. C'est essentiellement sur cette partie que porte notre étude. Les parties II et III présentent les principes de la structure atomique : la partie II vise à attribuer des configurations définies aux différents atomes chimiques, la partie III propose une nouvelle conception de la liaison moléculaire.

Rutherford souhaitait un texte plus court, Bohr ne lui donne pas satisfaction : il ne se contente pas de donner la dernière version de sa théorie, il y retrace aussi le cheminement de sa pensée. La formule de Balmer n'est pas (pas encore) au départ du raisonnement, et ce pour deux raisons. La première, c'est l'attachement de Bohr au processus de formation de l'atome. Outre son intérêt constant pour l'étude des propriétés chimiques de l'atome, Bohr peine à se dégager de la conception dominante selon laquelle le rayonnement spectral accompagne uniquement la (re)formation de

l'atome après une ionisation. La deuxième raison pour laquelle Bohr ne s'appuie pas sur la formule de Balmer, c'est son obstination à construire une théorie sur la base d'une condition quantique, par analogie avec la théorie de l'oscillateur que Planck vient de proposer (encadré 1).

Bohr considère la formation d'un atome d'hydrogène. Au commencement de l'interaction avec le noyau, l'électron est situé à une grande distance et sa vitesse relative est quasi nulle. Dans un état lié, l'électron décrit autour du noyau une orbite supposée circulaire. La mécanique classique permet de calculer l'énergie de liaison entre l'électron et le noyau, mais elle ne permet pas de prévoir l'existence d'une série discontinue de valeurs. Pour arriver aux états stationnaires, il faut donc faire appel à une hypothèse non classique. Bohr envisage d'abord une hypothèse particulière, directement suggérée par la théorie de Planck :

« Supposons que, durant la liaison de l'électron, un rayonnement homogène [nous dirions monochromatique] est émis, de fréquence ν égale à la moitié de la fréquence de révolution f_n de l'électron sur son orbite finale ; alors, d'après la théorie de Planck, nous pouvons nous attendre à ce que la quantité d'énergie émise par le processus considéré soit égale à $n h \nu$, où h est la constante de Planck et n un nombre entier. Si nous supposons que le rayonnement émis est homogène, la seconde hypothèse [$\nu = f_n/2$] concernant la fréquence du rayonnement va de soi, puisque la fréquence de révolution de l'électron au début de l'émission est zéro. » (I, p. 5).

Notons incidemment que, pour poser sa condition de quantification, $W_n = n h f_n/2$, Bohr ne s'est pas complètement affranchi de la théorie classique. Certes, il ne dit pas que la fréquence du rayonnement émis est égale à celle du mouvement de l'électron, mais il admet quand même une semblable relation, puisqu'il suppose que la fréquence du rayonnement émis pendant la formation d'un état stationnaire est égale à la moyenne des fréquences orbitales de l'électron dans l'état ionisé initial (fréquence zéro) et dans l'état lié final (fréquence f_n). Ainsi la seconde hypothèse ($\nu = f_n/2$) « va de soi », selon Bohr.

Par un calcul classique, Bohr établit une relation entre la fréquence orbitale de l'électron et l'énergie qu'il faut lui fournir pour le placer sur une orbite de rayon infini. Puis, en tenant compte de la condition de quantification, il détermine les énergies des différents états stationnaires, $W_n = -2\pi^2 m e^4 / n^2 h^2$, où m désigne la masse de l'électron et e sa charge électrique, ainsi que les fréquences de révolution, f_n .

On s'attend à ce que Bohr en déduise aisément la formule de Balmer, mais des obstacles conceptuels l'en empêchent. Outre qu'il demeure plus ou moins attaché à l'idée d'une émission spectrale produite pendant la (re)formation de l'atome par liaison de l'électron, il doit endosser les conséquences d'une représentation du rayonnement calquée sur celle de Planck. Or, l'émission de n quanta de même fréquence $f_n/2$ lors de la formation du n -ième état stationnaire ne donne pas les raies décrites par la formule de Balmer. Bohr est conscient du problème, et il laisse percer son désarroi. Il s'appuie alors sur une critique de la théorie de Nicholson pour formaliser la difficulté :

« Dans les calculs de Nicholson la fréquence des raies spectrales est identifiée à la fréquence de vibration d'un système mécanique dans un état d'équilibre distinctement indiqué. Puisqu'une relation à partir de la théorie de Planck est utilisée, nous pouvons nous attendre à ce que le rayonnement soit émis en quanta ; mais les systèmes comme ceux considérés, dans lesquels la fréquence est une fonction de l'énergie, ne peuvent pas émettre une quantité finie d'un rayonnement homogène [monochromatique] ; car, aussitôt que l'émission du rayonnement est commencée, l'énergie et aussi la fréquence du système sont modifiées. » (I, p. 7).

En rencontrant le problème de l'« inhomogénéité » (ou du caractère non monochromatique) du rayonnement émis, Bohr





prend conscience des inconvénients d'une analogie trop stricte avec la théorie de l'oscillateur de Planck. Il se tire d'embarras en remarquant que la difficulté en question disparaît si le processus d'émission est considéré autrement. Il envisage la possibilité du passage de l'atome entre différents états stationnaires. Il suppose que le passage de l'état n_2 à l'état n_1 s'accompagne de l'émission d'un rayonnement « homogène », dont la fréquence ν est régie par l'équation $W_{n_2} - W_{n_1} = h\nu$. Il obtient :

$$\nu = (2\pi^2me^4/h^3) [(1/n_2^2) - (1/n_1^2)]$$

Cette expression est en bon accord, tant quantitatif que qualitatif, avec la loi donnant les fréquences des raies du spectre de l'hydrogène. S'il fait $n_2 = 2$ et s'il fait varier n_1 , il obtient la série de Balmer. S'il fait $n_2 = 3$, il obtient la série de Paschen. Ces résultats encourageants conduisent Bohr à changer de point de vue et à proposer une nouvelle version de sa théorie, plus cohérente, et moins dépendante de la théorie de l'oscillateur de Planck.

... à une analogie purement formelle

« Nous avons supposé que les différents états stationnaires correspondent à l'émission d'un nombre différent de quanta d'énergie. Cependant, vu que nous considérons des systèmes dans lesquels la fréquence est une fonction de l'énergie, cette hypothèse peut être regardée comme improbable ; car, aussitôt qu'un quantum est émis, la fréquence est changée. Maintenant nous allons voir que nous pouvons oublier l'hypothèse utilisée et conserver la même équation [$W_n = nhf_n/2$], donc l'analogie formelle avec la théorie de Planck. D'abord, on observera qu'il n'a pas été nécessaire, pour rendre compte de la loi des spectres à l'aide des expressions précédentes de l'énergie et de la fréquence de révolution pour les états stationnaires, de supposer qu'un rayonnement est émis correspondant à plus d'un seul quantum d'énergie, $h\nu$. » (I, p. 12).

Reproduisons la nouvelle démonstration dans ses grandes lignes. Bohr pose une condition quantique plus générale que la précédente : la quantité d'énergie émise, lorsque l'électron est lié à partir du repos, est de la forme $W_n = F(n).hf_n$, où F est une fonction inconnue. Par un calcul semblable à celui de la précédente version, il détermine les énergies des états stationnaires : $W_n = \pi^2me^4/2h^2F^2(n)$. La deuxième nouveauté consiste à la fois dans la possibilité de passage de l'atome d'un état sta-

tionnaire à un autre, et dans l'hypothèse que, lors d'un tel passage, un seul quantum d'énergie $h\nu$ est émis (la fréquence ν du rayonnement étant donnée par la relation $W_{n_2} - W_{n_1} = h\nu$). Bohr retrouve la formule de Balmer à condition que $F(n) = \alpha n$. Pour déterminer la valeur de la constante α , il considère le passage du système entre les deux états $n = N$ et $n = N - 1$. Introduisant $F(n) = \alpha n$, il obtient la valeur de la fréquence ν du rayonnement émis lors de ce passage, ainsi que les valeurs des fréquences de révolution f_N et f_{N-1} de l'électron avant et après l'émission. Si N est grand, il trouve que le rapport entre les fréquences de révolution avant et après l'émission est très voisin de 1. Par ailleurs, l'électrodynamique ordinaire lui permet d'affirmer que le rapport entre la fréquence de rayonnement et la fréquence de révolution est aussi, dans ce cas, très voisin de 1. Cette condition est satisfaite si $\alpha = 1/2$, donc $F(n) = n/2$.

Bohr arrive ainsi à la même expression $W_n = nhf_n/2$ de la condition quantique, et, par conséquent, aux mêmes expressions pour les états stationnaires que celles obtenues auparavant. Il est donc conduit à changer son interprétation de l'équation $W_n = nhf_n/2$: l'énergie émise lors de la formation du n -ième état stationnaire ne consiste pas en n quanta de fréquence $f_n/2$, mais plutôt en un quantum unique, de fréquence $nf_n/2$. Il peut donc regarder les hypothèses particulières de la version précédente comme une « forme de représentation » des résultats de la théorie, ou, en d'autres termes, considérer l'analogie avec la théorie de l'oscillateur de Planck comme purement formelle.

Il convient d'insister sur l'intérêt épistémologique de cet article. Bohr tient à indiquer les chemins qu'il a empruntés, même s'ils sont tortueux ou hasardeux. Il veut montrer les outils conceptuels qu'il est en train de forger, même s'ils ne sont pas encore au point ; la correspondance qu'il entrevoit entre la théorie quantique en construction et l'électrodynamique classique en est un fameux exemple :

« Plus d'information sur la fréquence du rayonnement peut être obtenue en comparant les calculs du rayonnement d'énergie dans la région des lentes vibrations [celle des orbites externes] sur la base des hypothèses ci-dessus avec les calculs basés sur la mécanique ordinaire. Comme on sait, les calculs sur cette dernière base sont en accord avec les expériences sur le rayonnement d'énergie dans la région mentionnée. » (I, p. 12).

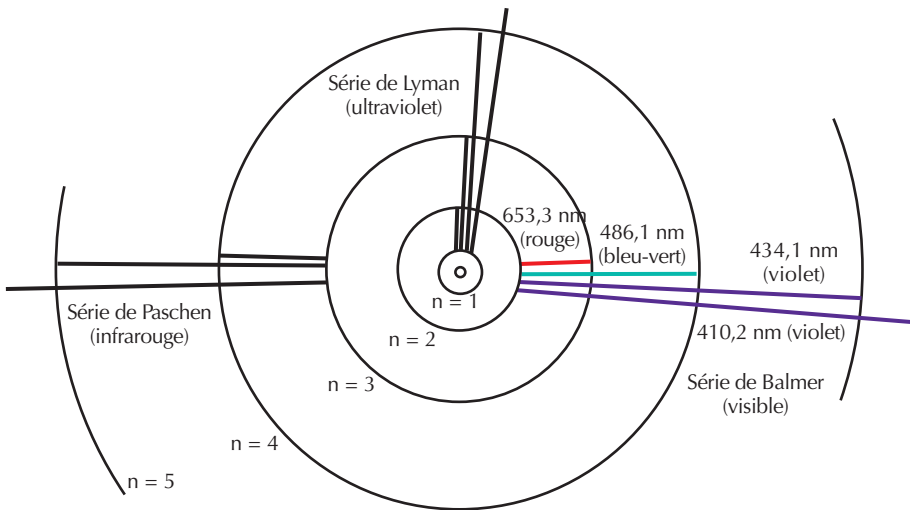
Bohr met en relation le rayonnement émis et le mouvement électronique orbital, il jette ici les bases du principe de correspondance. Il va même plus loin. Considérant le passage du système entre les deux états N' et $N' - N$, où N est petit comparé à N' , il obtient, avec la même approximation que ci-dessus, et en tenant compte de $F(n) = n/2$, l'expression suivante de la fréquence du rayonnement émis : $\nu = Nf$, où f désigne la fréquence de révolution de l'électron, à peu près la même avant et après l'émission. Il commente ce résultat en ces termes :

« La possibilité d'une émission de rayonnement à cette fréquence [Nf] peut aussi être interprétée à partir de l'analogie avec l'électrodynamique ordinaire, puisqu'un électron tournant autour d'un noyau sur une orbite elliptique émettra un rayonnement qui, selon le théorème de Fourier, peut être résolu en composantes homogènes dont les fréquences sont Nf , si f est la fréquence de révolution de l'électron. » (I, p. 14).

Le passage entre deux états stationnaires est associé à l'une des composantes harmoniques du développement en série de Fourier du mouvement électronique. Ultérieurement, Bohr sera conduit à généraliser cette idée et à considérer la possibilité de la production d'un passage entre deux états stationnaires donnés comme conditionnée par l'existence, dans le mouvement, de la vibration harmonique correspondante.

L'invention de la notion de transition quantique

Le 20 décembre 1913, lors d'une conférence donnée à la Société de Physique du Danemark [1], Bohr présente une nouvelle version de sa théorie. Cette fois, le processus de formation de l'atome est complètement ignoré et l'attention est d'emblée tournée vers le spectre. Si celui-ci contient une raie de fréquence ν , c'est parce qu'un atome a effectué une transition entre deux états dont la différence d'énergie vaut $h\nu$ (fig. 2). Bohr fait alors le rapprochement avec la formule de Balmer, et il obtient donc $-W_n = -Rhc/n^2$ pour l'énergie de l'atome d'hydrogène dans le n -ième état, et $f_n = (2R^3h^3c^3/\pi^2me^4n^6)^{1/2}$ pour la fréquence de révolution de l'électron. Si n est grand, la fréquence de la radiation émise lors de la transition entre les états n et $n-1$ est approximativement $\nu = 2Rc/n^3$. En raison de la correspondance avec l'électrodynamique classique, cette fréquence doit aussi



2. Modèle de l'atome de Bohr qui montre les états électroniques d'énergie quantifiée, caractérisés par le nombre quantique n , et les transitions $n_{i+1} \rightarrow n_i$ entre niveaux électroniques correspondant aux raies du spectre d'émission.

être égale à la fréquence de révolution ; une condition qui sera remplie seulement si la constante de Rydberg a pour valeur $R = 2\pi^2me^4/ch^3$. En utilisant cette valeur de R , Bohr obtient, pour le n -ième état, $W_n = nhf_n/2$. Cette équation est entièrement analogue à l'hypothèse de Planck concernant l'énergie d'un résonateur. En effet :

« On montre facilement que W [travail qu'il faudrait fournir au système pour éloigner l'électron à une distance infinie du noyau] est égal à la valeur moyenne de l'énergie cinétique de l'électron pendant une révolution. Planck a montré que l'énergie d'un résonateur est toujours égale à $nh\nu$. En outre, la valeur moyenne de l'énergie cinétique d'un oscillateur de Planck est égale à son énergie potentielle, de sorte que la valeur moyenne de l'énergie cinétique du résonateur est, suivant Planck, égale à $nh\nu/2$. Cette analogie suggère une autre manière de présenter la théorie, et c'est précisément par cette voie que j'ai été conduit à ces réflexions. Quand nous considérons combien est différent le sens dans lequel l'équation est employée ici et dans la théorie de Planck, il me semble fallacieux d'employer comme base cette analogie, et, dans l'exposé que je vous ai fait, j'ai essayé autant que possible de m'en délivrer. » ([1], p. 20).

Bohr est maintenant convaincu que l'analogie avec l'oscillateur de Planck ne peut être le fondement du calcul du rayonnement. Un fait le renforce dans cette opinion : Debye a montré qu'il est possible d'obtenir la formule de Planck du rayonnement sans utiliser d'autre hypothèse sur les oscillateurs que celle selon

laquelle le transfert d'énergie entre les oscillateurs et le rayonnement a lieu par quanta $h\nu$ (P. Debye, *Annalen der Physik*, **33** (1910) 1427). Bohr juge donc plus pertinent de baser son calcul du rayonnement sur la loi de fréquence $W_2 - W_1 = h\nu$ et sur les lois des spectres de raies. Il associe le rayonnement au processus de transition entre deux états stationnaires et il prend la formule de Balmer comme point de départ. Ainsi, pour ce qui concerne le rayonnement, la théorie de l'oscillateur de Planck s'est progressivement effacée, en même temps qu'est apparue une notion capitale pour le progrès de la théorie quantique : le processus de transition quantique.

La quantification du moment angulaire

Malgré tout, Bohr reste attaché à l'oscillateur de Planck : ce qui compte maintenant, c'est l'analogie avec l'énergie mécanique que possède l'oscillateur, et non pas l'analogie avec l'énergie qu'il rayonne. On l'a vu, dans sa conférence de décembre 1913 [1], Bohr conçoit nettement la relation $W_n = nhf_n/2$ comme une restriction sur les valeurs de l'énergie cinétique d'un électron ($T_n = nhf_n/2$), et non pas sur l'énergie rayonnée. À vrai dire, la recherche d'une quantification des variables mécaniques est déjà en germe dans ses premiers écrits (le memorandum y compris) :

« Bien qu'il ne puisse être question ici d'un fondement mécanique des calculs donnés dans

cet article, il est cependant possible de donner une interprétation très simple de nos résultats à l'aide des symboles de la mécanique ordinaire. En désignant le moment angulaire de l'électron autour du noyau par M , nous avons immédiatement, pour une orbite circulaire, $\pi M = T/f$, où f est la fréquence de révolution et T l'énergie cinétique de l'électron ; pour une orbite circulaire, nous avons $T = W$, et, vu que $W = nhf/2$, nous obtenons $M = nM_0$, où $M_0 = h/2\pi$. Par conséquent, si nous supposons que l'orbite de l'électron dans les états stationnaires est circulaire, le résultat de nos calculs des états stationnaires peut être exprimé par la condition simple : le moment angulaire de l'électron autour du noyau dans un état stationnaire du système est égal à un multiple entier d'une valeur universelle, indépendante de la charge du noyau. » (I, p. 15).

Cette première forme de quantification du moment angulaire est aussitôt mise à profit. Après l'atome d'hydrogène, Bohr aborde l'étude d'un système atomique quelconque. Il se limite à la discussion de l'état permanent du système ($n = 1$). Cette configuration est celle pour laquelle la plus grande quantité d'énergie a été émise. Les électrons sont supposés arrangés en un anneau circulaire. Le moment angulaire de chacun d'eux est égal à $h/2\pi$. La stabilité de l'anneau est garantie par la condition de la constance universelle du moment angulaire et la condition supplémentaire que la configuration des particules est celle pour laquelle la formation a exigé l'émission de la plus grande quantité d'énergie. Suivant Bohr, la condition sur le moment angulaire n'est applicable qu'aux atomes à l'état permanent. Dans cet état, les orbites sont circulaires, l'énergie cinétique des électrons est constante, le moment angulaire est lui-même constant. En revanche, dans les états excités, pour des orbites elliptiques, Bohr ne peut envisager de quantifier une grandeur qui n'est pas une constante du mouvement.

Incidentement, Bohr fait remarquer qu'il n'est pas le premier à entrevoir l'importance probable du moment angulaire dans la discussion des systèmes atomiques en relation avec la théorie de Planck. Nicholson, immédiatement après avoir posé que le rapport de l'énergie à la fréquence est un multiple de la constante de Planck, notait déjà que ce rapport est proportionnel au moment angulaire, et que l'introduction du quantum peut donc « signifier que le moment angulaire d'un atome peut seulement croître ou décroître par quantités discrètes quand les électrons partent ou reviennent » [2]. Nicholson n'avait pas pour autant une





idée claire de la détermination des orbites électroniques à partir d'une condition quantique portant sur le moment angulaire. Aussi l'opinion commune selon laquelle Bohr lui aurait emprunté l'idée de quantification du moment angulaire pour construire sa théorie n'est-elle pas justifiée. Elle l'est d'autant moins que la condition quantique de Bohr, on l'a vu, n'est pas établie en termes de moment angulaire.

Bohr perfectionne sans cesse son modèle. Dès qu'il a connaissance de l'effet Stark (décomposition des raies spectrales sous l'influence d'un champ électrique), il en fournit une explication, invoquant la forme elliptique des orbites [3]. Puis il attribue à une possible variation de la masse de l'électron avec sa vitesse l'écart minime entre la formule de Balmer et les

résultats des mesures très précises exécutées tout récemment par W. E. Curtis [4]. Ses travaux attirent l'attention de Sommerfeld. Ils font naître chez ce dernier un intérêt – étranger à la tradition allemande – pour les problèmes concernant la structure de l'atome. Sommerfeld se saisit des idées suggérées par Bohr, et notamment celles d'orbites elliptiques et d'effets relativistes, et les incorpore dans une théorie mathématique en bon accord avec les observations expérimentales [5]. Cette théorie s'appuie sur l'hypothèse du quantum d'action h , que Planck a formulée en 1906 dans ses *Vorlesungen*, et qu'il a développée au Conseil Solvay de 1911 dans son rapport sur « la loi du rayonnement noir et l'hypothèse des quantités élémentaires d'action » (encadré 3). Considérant un modèle d'atome d'hydrogène dans lequel l'électron décrit

des orbites elliptiques, Sommerfeld applique la condition quantique $\iint dp dq = h$, ou $\int p dq = nh$, successivement aux trois coordonnées q (latitude, rayon vecteur, azimut) et aux moments conjugués p correspondants.

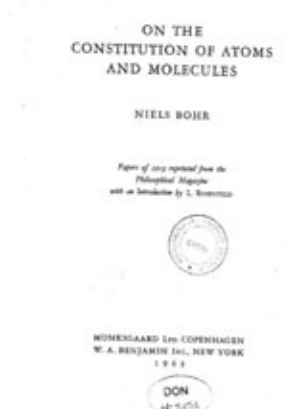
La théorie de Sommerfeld est souvent considérée comme une généralisation de la théorie de Bohr. C'est aussi ce que prétendait son auteur. Voulait-il seulement dire que la théorie de Bohr avait éveillé chez lui l'intérêt pour une théorie de l'atome ? On peut en douter : Sommerfeld soutenait que Bohr avait quantifié le moment angulaire et qu'il en déduisait la formule de Balmer. Cette déformation de la réalité, dont les raisons semblent obscures, a pu contribuer au succès rapide de l'atome de Bohr et à un nouveau développement de la théorie des quanta. ■

► Les sources documentaires

encadré 2

Notre principale source est : N. Bohr, *On the constitution of atoms and molecules*, Papers of 1913 reprinted from the *Philosophical Magazine* with an Introduction by L. Rosenfeld, Copenhagen, Munksgaard, New York, Benjamin, 1963. L'ouvrage comprend trois parties : I. Binding of electrons by positive nuclei, 1-25 ; II. Systems containing only a single nucleus, 26-54 ; III. Systems containing several nuclei, 55-77. L'introduction contient, entre autres écrits de Bohr, le memorandum de Manchester de 1912, la lettre à E. Rutherford du 31 janvier 1913, la lettre à G. Hevesy du 7 février 1913.

Par ailleurs, notre article s'inspire des travaux de J. L. Heilbron et T. S. Kuhn, "The genesis of the Bohr atom", *Historical Studies in the Physical Sciences*, **1** (1969) 211-290, et des critiques formulées par T. Hirose et S. Nisio, "The genesis of the Bohr atom model and Planck's theory of radiation", *Japanese Studies in the History of Science*, **9** (1970) 35-47.



► L'hypothèse du quantum d'action de Planck encadré 3

La constante h a la dimension d'une action (une énergie multipliée par un temps). Planck se propose de montrer que la signification profonde de h est d'être la quantité élémentaire d'action. Il considère le système rayonnant le plus simple, l'oscillateur harmonique linéaire. L'hypothèse des quanta consiste essentiellement à imposer une restriction à la multiplicité des états permis de l'oscillateur. Au point de vue statistique, cela revient à diminuer, dans le plan des phases (q, p) , où p désigne le moment conjugué de la variable q de position, le nombre des domaines élémentaires également probables qui définissent les états discernables du système.

Alors que, en mécanique statistique classique, la taille de ces domaines peut être choisie aussi petite que l'on veut, la diminution imposée à leur nombre par la théorie des quanta leur impose au contraire une taille finie. Quelle est la grandeur d'un tel domaine ? Le point représentatif d'un oscillateur de fréquence ν , d'énergie U , décrit une ellipse d'aire U/ν . Le domaine élémentaire cherché, correspondant à l'intervalle d'énergie ΔU , est un anneau elliptique, d'aire $\Delta U/\nu$. Pour que la plus petite différence d'énergie discernable soit $h\nu$, il faut que la surface du domaine élémentaire, $\iint dp dq$, ait pour grandeur h . Ainsi la constante h occupe-t-elle une position éminente : elle apparaît primordialement comme le quantum d'action, tandis que le quantum d'énergie est relégué au second plan.

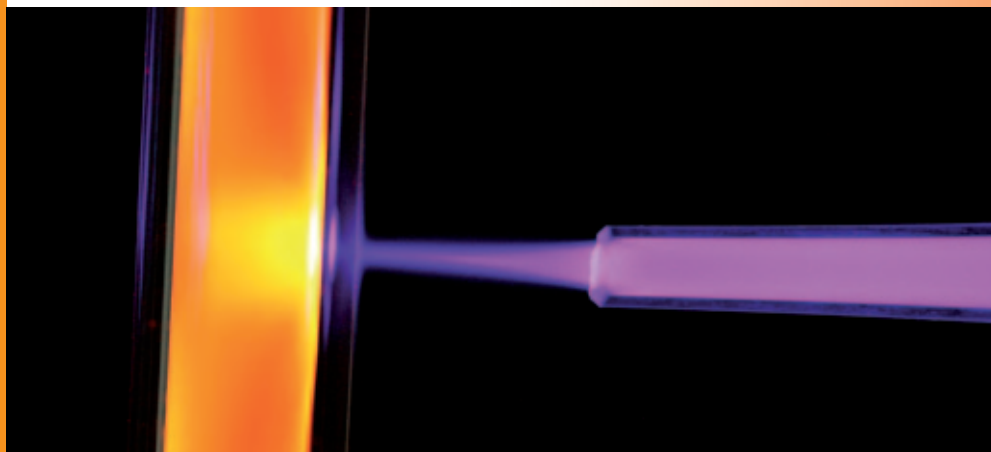
En savoir plus

Documents originaux

1. N. Bohr, Conférence du 20 décembre 1913 à la Société de Physique du Danemark, dans *Les spectres et la structure de l'atome*, traduit par A. Corvisy, Hermann, Paris (1923), pp. 5-27.
2. J. W. Nicholson, "The constitution of the solar corona", *Monthly notices of the Royal Astronomical Society of London*, **72** (1912) 677-692.
3. N. Bohr, "On the effect of electric and magnetic fields on spectral lines", *Phil. Mag.*, **27** (1914) 506-524.
4. N. Bohr, "On the series spectrum of hydrogen and the structure of the atom", *Phil. Mag.*, **29** (1915) 332-335.
5. A. Sommerfeld, "Zur Quantentheorie der Spektrallinien", *Annalen der Physik*, **51** (1916) 1-44, 44-94, 125-167.

Ouvrages contemporains

- H. Kragh, *Niels Bohr and the quantum atom. The Bohr model of atomic structure 1913-1925*, Oxford University Press, Oxford (2012).
- B. Pourprix, *D'où vient la physique quantique ?*, Vuibert-Adapt, Paris (2009).



Transfert d'une colonne de plasma d'un tube issu d'un réacteur DBD annulaire parcouru par de l'hélium, dans un tube sans électrode parcouru par du néon (voir encadré 1, p. 19).

Applications thérapeutiques des plasmas froids atmosphériques

Jean-Michel Pouvesle (jean-michel.pouvesle@univ-orléans.fr) et **Éric Robert**

Groupe de Recherches sur l'Énergétique des Milieux Ionisés (GREMI), UMR 7344 CNRS-Université d'Orléans, BP 6744, 45067 Orléans Cedex 2

Depuis quelques années, des avancées importantes sont réalisées sur les applications des plasmas froids à la biologie. À côté des secteurs déjà bien identifiés que sont la stérilisation/décontamination, l'ingénierie de surface, les biomatériaux et l'ingénierie des tissus, les applications thérapeutiques des plasmas connaissent un développement extraordinaire. Si les processus impliqués sont loin d'être bien compris, les premières applications cliniques font leur apparition.

Après avoir évoqué les sources et les réacteurs adaptés, nous présenterons quelques développements récents importants relatifs à l'effet antitumoral des plasmas froids.

Dans un proche avenir, les médecins parlant de « plasma » dans le cadre de leurs activités devront sans doute préciser de quel plasma il s'agit : plasma sanguin ou gaz ionisé. En effet, les plasmas froids hors équilibre à la pression atmosphérique (PFA), créés par décharge électrique, présentent des caractéristiques qui les rendent très attractifs pour le développement de nouveaux procédés dans le domaine médical et particulièrement pour de nouvelles applications thérapeutiques. Ce domaine, maintenant dénommé « médecine plasma », a connu des développements spectaculaires au cours des dernières années, surtout depuis 2005. Il a notamment été montré que de très nombreuses applications pouvaient être abordées, concernant aussi bien la coagulation du sang, la prévention du développement de bactéries sur des organes opérés, que le secteur dentaire, la dermatologie, les soins sur des plaies persistantes ou des ulcères, la médecine régénérative ou le traitement de tumeurs, pour ne citer que quelques exemples.

L'engouement suscité par les recherches concernant les applications biomédicales des plasmas froids est tel que des sessions spécialisées sont organisées dans tous les grands symposiums ou conférences plasmas. Le domaine où les progrès ont été les plus spectaculaires est certainement celui du traitement des blessures chroniques (plaies ou ulcères), pour lequel des essais cliniques sur un grand nombre de patients ont déjà

été réalisés. En France, les travaux effectués à Orléans par le GREMI et le CIPA-TAAM, en collaboration avec le CBM^(a), ont permis d'obtenir des résultats majeurs concernant l'effet antitumoral des plasmas et ainsi d'occuper une position de leader dans ce domaine.

Pourquoi les PFA, pourquoi maintenant ?

Les plasmas sont des sources naturelles d'espèces actives. Dans l'air, ils peuvent facilement conduire à la production d'espèces réactives de l'oxygène et de l'azote^(b), dont le rôle a déjà été mis en évidence dans des thérapies établies. Que le plasma soit produit directement dans l'air ou dans un gaz rare débouchant à l'air libre, il conduit à des transferts d'énergie sur les molécules d'azote et d'oxygène et produit ainsi des radicaux OH ou NO. Ces radicaux sont connus, pour le premier, comme l'un des précurseurs de la chaîne de processus renforçant le stress oxydatif^(c) au sein des cellules et tissus vivants, ou favorisant l'angiogenèse^(d) ou la réparation tissulaire pour le second. On peut d'emblée souligner que les plasmas permettront un traitement localisé et non pas systémique comme c'est le cas lors de l'absorption de médicaments, et qu'ils ne conduiront pas en général à la production de produits ou sous-produits à éliminer par le corps ou à retraiter.

>>>



Les deux principaux paramètres qui contrôlent les plasmas doivent s'accommoder de la nature vivante de la cible : pression atmosphérique et température d'utilisation inférieure à 42°C (température ambiante, si possible). Notons, cependant, que des plasmas thermiques, beaucoup plus chauds (quelques centaines à quelques milliers de degrés), sont déjà présents dans les salles d'opération. Il s'agit de « couteaux à argon » ou d'électrocoagulateurs. Ces minitorches plasma radiofréquence (RF), fonctionnant en général avec de l'argon ou des mélanges argon-hélium à des débits de quelques litres par minute, sont utilisées en chirurgie pour leurs caractéristiques thermiques. Elles permettent une coagulation rapide lors de la découpe de tissus ou d'organes, évitant ainsi des saignements importants.

Les plasmas froids, le plus souvent à basse pression, sont depuis plus de vingt-cinq ans utilisés dans le cadre de la stérilisation et de la décontamination d'objets fragiles. Ils ont démontré depuis longtemps un pouvoir bactéricide et antimicrobien d'un grand intérêt pour le secteur de la santé. Mais jusque récemment, les préoccupations des spécialistes des plasmas froids à la pression atmosphérique, éloignées du monde de la biologie, étaient surtout focalisées sur la production de sources de rayonnement et sur la transformation des effluents gazeux à des fins de dépollution. La réalisation de systèmes compacts, permise par les progrès récents de l'électronique – plus particulièrement de l'électronique

de mise en forme et de commande des impulsions haute tension –, conjuguée à l'engouement pour les recherches pluridisciplinaires, ont créé les conditions favorables au rapprochement avec la communauté des biologistes. Il existe maintenant à travers le monde des laboratoires et des instituts⁽⁶⁾ complètement dédiés à cette thématique, où sont rassemblés des spécialistes de l'ensemble des disciplines impliquées. En France, les principaux laboratoires travaillant dans ce domaine sont réunis depuis janvier 2010 au sein du GDR 3374 ABioPlas : Applications Biomédicales des Plasmas.

Des réacteurs adaptés

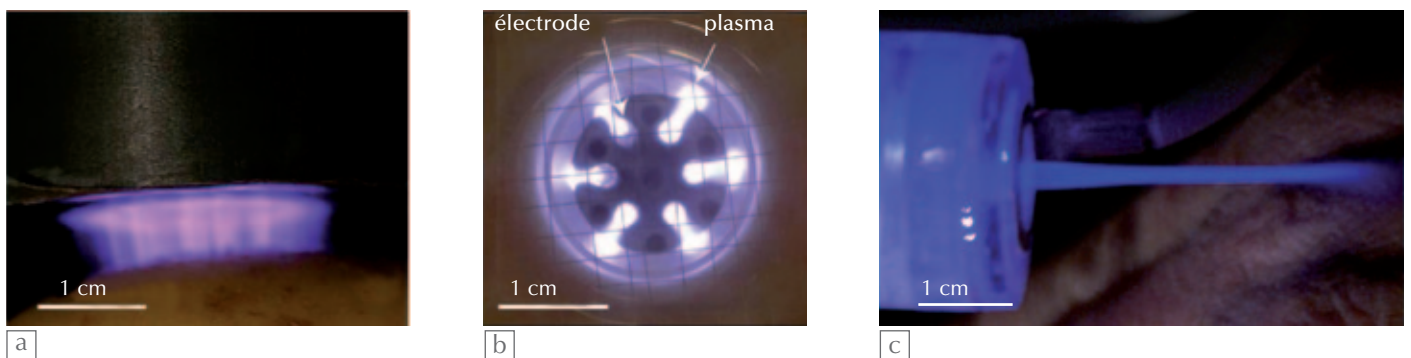
Les réacteurs permettant de produire les plasmas adéquats (fig. 1) sont essentiellement de deux types.

1) **Les systèmes de décharges à barrières diélectriques (DBD, fig. 1a)**, où l'une des électrodes est recouverte d'une couche diélectrique évitant toute production d'arc. Ces décharges, à la pression atmosphérique, conduisent en général à la production d'un grand nombre de petits filaments de plasma répartis aléatoirement à la surface de l'électrode. Le milieu plasmagène (mélange de gaz où se développe le plasma) est directement l'air ambiant. Le réacteur doit être proche (quelques mm) de la surface à traiter, et la cible est la deuxième électrode. On utilise généralement la dénomination de DBD à électrode flottante, ou FE DBD (*Floating Electrode*). Ces dispositifs

sont alimentés, la plupart du temps, en haute tension alternative (quelques kV) à haute fréquence (de quelques kHz à quelques dizaines de kHz). Ce type de réacteur est particulièrement adapté aux traitements de surface et ne génère pas d'ultraviolets C (de longueurs d'ondes comprises entre 200 et 280 nm).

2) **Les jets de plasmas eux-mêmes, divisés en deux grandes catégories** : les plasmas radiofréquence et micro-onde (fig. 1b) et les plasmas créés par DBD annulaire (fig. 1c). Initiés dans des gaz rares, essentiellement hélium et argon, ils débouchent dans l'air sous forme d'une plume plasma dont les espèces actives et les photons transfèrent leur énergie sur les composants de l'air en périphérie. Le débit de gaz (1 à 10 litres par minute) a une forte influence sur la longueur de la plume et la production des espèces actives. Dans le cas des plasmas radiofréquence, dont la température en sortie immédiate du réacteur (70–80°C) est significativement supérieure à la température de traitement requise, le réacteur doit être maintenu à une distance suffisante de la cible, de l'ordre du cm. Les jets de plasma offrent une grande souplesse d'utilisation (adaptation des paramètres de débit de gaz, mélange de gaz, tension, fréquence, cycle de décharge), particulièrement adaptée à des traitements précis ou robotisés.

Il est important de noter que, quel que soit le type de décharge utilisé parmi celles qui sont mentionnées ci-dessus, le réacteur



1. Sources de plasma à la pression atmosphérique pour des applications thérapeutiques.

- (a) Système de décharges à barrières diélectriques à électrode flottante (FE DBD) dans l'air, avec *gap* de 4 mm (sous 20 kV à 1 kHz) (GREMI Orléans, France). La surface à traiter est en bas de la photo.
- (b) Torche plasma radiofréquence MicroPlaSter à flux d'argon de 2,2 litres par minute (100 W à 2,3 GHz) (Adtec, UK, et MPE, Garching, Allemagne). Six petits plasmas sont créés entre six électrodes en acier inoxydable et la surface intérieure d'un cylindre d'aluminium. Les jets de plasma sortent perpendiculairement au plan de la figure.
- (c) Jet de plasma produit par un système de décharges à barrières diélectriques annulaires à flux d'hélium de 3,5 litres par minute (sous 5 kV à 5 kHz) (LPEI, Norfolk, USA).

plasma se trouve toujours à proximité de la cible (tissu, organe), ce qui peut poser des problèmes de manipulation ou d'accès. Pour pallier ce problème, le GREMI a développé une nouvelle catégorie de réacteurs, appelés *Plasma Gun* (voir encadré 1), qui permettent de générer des plumes plasma à très longue distance (de quelques dizaines de cm à plus d'un mètre cinquante selon les paramètres de décharge) dans des tubes ou des capillaires diélectriques, dont le diamètre varie de quelques dizaines de micromètres à un centimètre. Ces réacteurs sont particulièrement adaptés aux traitements de cibles difficiles d'accès ou nécessitant une voie endoscopique.

Des essais cliniques

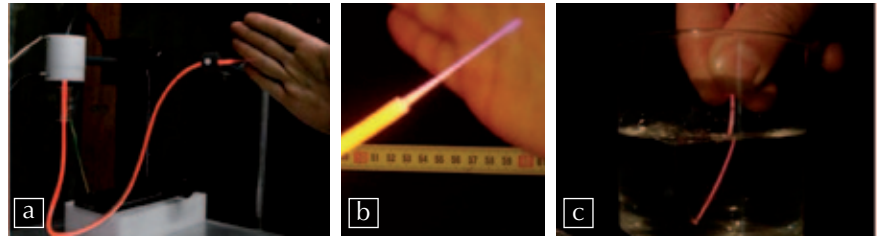
Parmi tous les résultats obtenus récemment à travers le monde en médecine plasma, on se contentera ici d'évoquer tout d'abord une application phare, puis de détailler les résultats obtenus à Orléans au sein du projet PLASMED.

Le traitement des plaies chroniques et des ulcères est l'application des plasmas la plus avancée, pour laquelle des essais cliniques ont été menés en Allemagne sur plusieurs centaines de patients présentant des ulcères infectés du bas de la jambe. Les résultats sont très encourageants (fig. 2) et démontrent l'intérêt des recherches dans ce domaine. Les traitements sont réalisés avec le dispositif appelé MicroPlaSter (Microwave Plasma Sterilizer, figs. 1b et 2a). Le plasma d'argon,



► Le Plasma Gun

encadré 1



E1. (a) *Plasma Gun* (néon, 400 cm³/minute, 1 kHz). (b) Plume *Plasma Gun* (néon, 1500 cm³/minute, 10 Hz). (c) Plume *Plasma Gun* débouchant dans l'eau à la sortie d'un capillaire de 200 µm de diamètre (néon, 50 cm³/minute, 50 Hz).

Les chercheurs du GREMI ont mis au point un nouveau type de générateur de plasmas froids à la pression atmosphérique (brevet CNRS/Université d'Orléans), qui permet de générer des colonnes pulsées de plasma à longue distance (de quelques cm à plus d'un mètre cinquante), dans des tubes ou capillaires diélectriques souples ou rigides (plastique, céramique, verre) (fig. E1a). À l'extrémité du capillaire, une plume plasma est produite dans l'air (fig. E1b) ou dans tout autre milieu, même liquide (fig. E1c). Ce dispositif permet d'amener le milieu réactif sur la zone de traitement et à distance du système de décharge à haute tension. Les colonnes de plasma se propagent dans les tubes à très grande vitesse, de quelques 10⁶ à quelques 10⁸ cm/s, selon les conditions de décharge et la distance au réacteur, et peuvent parcourir de quelques millimètres à quelques centimètres supplémentaires à l'air libre. Ce nouveau générateur de plasmas atmosphériques peut aussi bien fonctionner en régime monocoup qu'à des taux de répétition élevés de plusieurs kHz, donnant l'illusion d'un jet de plasma continu (fig. E1).

Ce procédé permet de bien doser le nombre d'espèces actives générées près de la surface à traiter. Alors que les jets de plasma classiques nécessitent des débits de gaz rares élevés, de 1 à 10 litres/minute, le *Plasma Gun* peut fonctionner à des débits extrêmement faibles, jusqu'à quelques cm³/minute, permettant des applications impossibles avec les autres systèmes, notamment à l'intérieur du corps. Les colonnes de plasma sont constituées d'une tête lumineuse, qui correspond à un front d'ionisation intense, et d'un canal beaucoup moins lumineux, qui relie électriquement ce front au réacteur. L'impédance du canal plasma créé va influencer sur la tension transmise, et donc sur le champ électrique créé en avant de la colonne, et finalement sur le taux d'ionisation et la vitesse de propagation. Les colonnes de plasma peuvent se diviser lorsqu'elles débouchent sur des ramifications (voir la photographie en tête d'article, p. 17).

Au-delà des traitements endoscopiques, le *Plasma Gun* est bien adapté pour des traitements dans des cavités ou des structures complexes. Ses applications dépassent largement le domaine de la biologie et concernent, entre autres, les traitements de surfaces ou la commutation rapide.



a



b 1 traitement



c 15 traitements



d 33 traitements

2. Traitement d'un ulcère par plasma d'argon.

(a) Dispositif de traitement MicroPlaSter, développé en partenariat entre le MPE[®] à Garching et l'entreprise Adtec au Royaume-Uni.

(b, c, d) Évolution de l'ulcère après 1, 15 et 33 traitements de deux minutes. La mire colorée permet de corriger les variations des conditions de photographie des plaies (éclairage, ombre...), la « couleur » de la plaie étant l'un des indicateurs de la cicatrisation. Données de l'hôpital Schwabing de Munich/MPE, Garching, Allemagne (G. Isbary *et al.*).



appliqué (en plus des soins courants) durant deux minutes tous les jours jusqu'à guérison ou amélioration suffisante, permet à la fois une débactérisation de la plaie et une aide à la reconstruction des tissus. De manière à travailler dans des conditions parfaitement reproductibles, et dans la mesure où la température de sortie du plasma est légèrement trop élevée, la distance au tissu traité est contrôlée au moyen d'un dispositif à ultrasons. Il est important de noter que les traitements n'engendrent pas d'effets secondaires ni de douleurs particulières.

Effet antitumoral des plasmas froids

L'utilisation des PFA dans le traitement de certains types de cancers apparaît aussi extrêmement prometteuse. Dès 2009 a eu lieu la première mise en évidence d'un effet antitumoral *in vivo* sur des souris porteuses de tumeurs cérébrales humaines⁽⁶⁾, avec des effets à court terme (régression de la masse tumorale) et des effets à long terme (augmentation de 60% de l'espérance de vie des souris). Il faut noter que ce type de tumeur est connu pour être particulièrement chimio- et radiorésistant. Ces travaux ont été les premiers d'une longue série d'expériences *in vitro* et *in vivo*, qui ont conduit

très récemment à des résultats remarquables sur l'association plasma/chimiothérapie appliquée au cancer du pancréas.

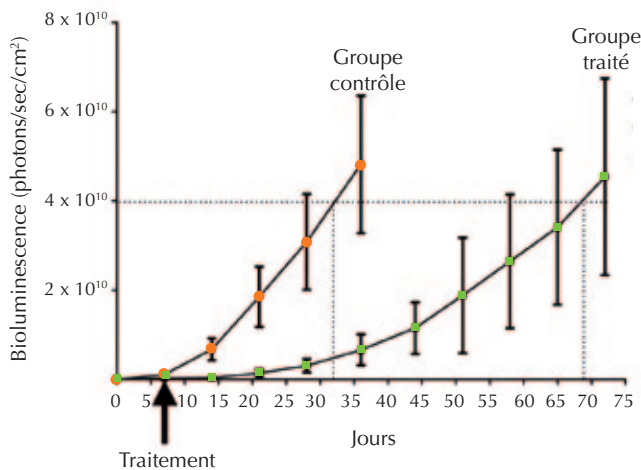
Les premières expériences ont été réalisées avec un dispositif du type de la figure 1a, en traitant les tumeurs greffées sur le haut de cuisse à travers la peau de souris "nude"⁽⁶⁾. Il a d'abord été montré que l'application du plasma sur des temps longs (supérieurs à dix minutes) n'entraînait pas d'effets secondaires à court terme – augmentation de la température de la peau (une augmentation de 2 à 3°C est néanmoins mesurée, mais disparaît immédiatement à l'arrêt du plasma), ou modification des rythmes cardiaque ou respiratoire des animaux – et n'engendrait pas non plus d'effets sur le comportement.

Les études *in vitro* ont été menées sur différentes lignées de cellules cancéreuses, cérébrales, du côlon, du pancréas et du poumon. Les expériences ont montré le rôle important joué par les espèces réactives de l'oxygène. Les plasmas induisent des cassures des doubles brins de l'ADN, conduisant à une apoptose (mort cellulaire programmée) massive des cellules, mise en évidence en particulier par bioluminescence (voir encadré 2). De plus, on a observé *in vitro* et *in vivo* un blocage du cycle cellulaire des cellules tumorales, conduisant à un arrêt de leur prolifération.

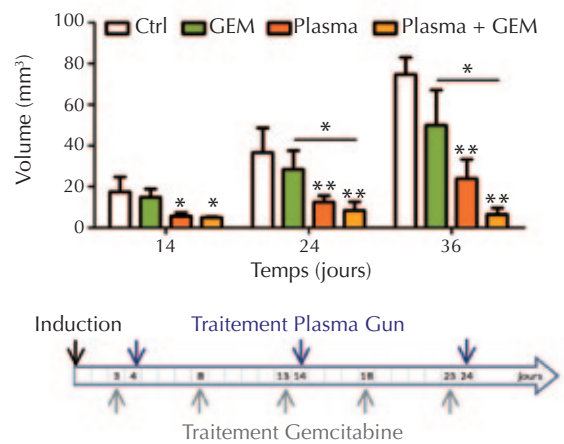
Les mécanismes mis en jeu sont proches de ceux qui sont induits par radiothérapie, mais sans les effets secondaires associés aux rayonnements ionisants. Les cellules saines, moins sensibles au stress oxydatif induit par le plasma, ne sont pas affectées dans ces conditions de traitement.

Des expériences menées sur le côlon avec le même dispositif FE DBD ont confirmé l'effet antitumoral des plasmas froids observé d'abord sur des tumeurs cérébrales. Mais les résultats les plus spectaculaires ont été obtenus avec le *Plasma Gun* sur des tumeurs orthotopiques de cancers du côlon et du pancréas. (Des tumeurs sont dites « orthotopiques » quand elles sont spécifiques à l'organe sur lequel elles sont greffées.) Les expériences impliquant des tumeurs orthotopiques sont beaucoup plus représentatives de situations cliniques et *a priori* plus prédictives de la réponse attendue chez l'homme. Bien que les tumeurs soient traitées uniquement sur leur surface accessible, il est important de noter que les analyses ont montré que la mort cellulaire était induite dans l'ensemble du volume tumoral.

Dans les expériences sur le cancer du côlon traité par *Plasma Gun*, le suivi comparé du groupe de souris contrôle et du groupe de souris traitées *in situ* (une seule application du *Plasma Gun* pendant 10 mn, sept jours



3. Carcinome du côlon. Suivi de la croissance tumorale par imagerie de bioluminescence de tumeurs greffées sur des souris "nude". Comparaison entre un groupe contrôle et un groupe traité au jour 7 (flèche sur la figure) par *Plasma Gun* à l'hélium (200 cm³/s pendant 10 minutes). On estime le gain d'espérance de vie à 115% pour le groupe traité par *Plasma Gun* (la durée de survie est définie par l'instant du franchissement d'un seuil de bioluminescence – ici 4.10¹⁰ photons/s/cm² – associé à un volume tumoral critique).



4. Adénocarcinome du pancréas. Comparaison de l'évolution du volume tumoral aux jours 14, 24 et 36 après injection, entre un groupe contrôle (Ctrl), un groupe traité à la gemcitabine (GEM), un groupe traité par *Plasma Gun* (Plasma) et un groupe ayant reçu un traitement combiné (Plasma + GEM). La séquence des traitements est indiquée sur le diagramme du bas. Une étoile (resp. deux étoiles) sur une barre d'histogramme (ou une ligne horizontale) indique une probabilité de 95% (resp. 99%) que la différence avec le groupe de contrôle (ou entre les groupes joints par la ligne) soit significative.

après le greffage de la tumeur) a montré une très nette réduction de la croissance tumorale chez les souris traitées (fig. 3). Le traitement plasma a entraîné une augmentation de 115% de leur espérance de vie. Au-delà de la réduction tumorale, ces expériences ont aussi permis de mettre en évidence une très nette réduction, voire une absence dans de nombreux cas, de la prolifération de métastases (voir la photo de l'encadré 2). Les mécanismes à l'origine de ce phénomène ne sont pas encore connus, mais suscitent le plus grand intérêt et feront l'objet d'études à venir.

Le cancer du pancréas est le cancer gastro-intestinal ayant le plus mauvais pronostic chez l'homme, avec un taux de survie à 5 ans de l'ordre de 5%. Afin d'évaluer l'efficacité du traitement par PFA, un modèle basé sur le développement de tumeurs de carcinome pancréatique a été développé en collaboration entre le CERB⁽⁴⁾ et le CIPA-TAAM. Des expériences ont été menées sur quatre groupes de souris "nude" porteuses de greffes de tumeurs, suivies par imagerie de bioluminescence *in vivo* : un groupe contrôle non traité, mais dont les individus ont été opérés comme dans les autres groupes ; un groupe traité uniquement par gemcitabine à 200 mg/kg, chimiothérapie de référence

pour le cancer du pancréas ; un groupe traité uniquement par *Plasma Gun* ; enfin un groupe subissant un traitement combiné de gemcitabine et de *Plasma Gun*. Les résultats (fig. 4) sont extrêmement encourageants. Non seulement ils ont permis pour la première fois de montrer un effet antitumoral des PFA par *Plasma Gun* sur le pancréas, mais – également pour la première fois – ils ont mis en évidence un effet bénéfique de l'association chimiothérapie/plasma froid atmosphérique. On peut voir que, 36 jours après l'injection, la réduction du volume tumoral (comparé au groupe contrôle) est plus importante dans le groupe *Plasma Gun* (68%) que dans le groupe gemcitabine (30%). Le résultat le plus frappant est, bien sûr, que le traitement impliquant chimiothérapie et PFA conduit à une réduction encore plus importante de la tumeur, de l'ordre de 90%.

Ces expériences ouvrent la voie à des traitements combinés sur les zones situées aux alentours immédiats d'une tumeur après son ablation chirurgicale, traitements qui permettraient soit de diminuer les doses de chimiothérapie pour le confort du patient, soit d'améliorer le pronostic vital à moyen terme. Ces travaux vont être poursuivis, afin de déterminer un optimum dans la séquence et les doses des

deux traitements. Comme pour le carcinome du côlon, les travaux réalisés sur l'adénocarcinome du pancréas ont aussi permis de montrer dans de nombreux cas une réduction importante de la prolifération des métastases. De nouvelles expériences vont être menées sur ce point particulier, afin de le confirmer et d'essayer de comprendre les mécanismes impliqués.

Vers des applications par voie endoscopique

L'ensemble des résultats obtenus laisse entrevoir de nombreux champs d'applications thérapeutiques des plasmas. Ceux-ci vont cependant nécessiter des efforts importants de recherche pour une meilleure compréhension des processus impliqués dans les interactions plasma/cellule et plasma/tissu, pour l'évaluation des effets à long terme, et pour le passage difficile mais indispensable des modèles animaux aux essais cliniques de grande envergure. Parmi toutes les sources de PFA, le *Plasma Gun* paraît particulièrement adapté à des traitements dans des structures complexes. On pense bien évidemment aux poumons, dont la possibilité de traitement a été démontrée dans le cadre du projet PLASMED, ou à des cibles, notamment tumorales, dans des territoires peu compatibles

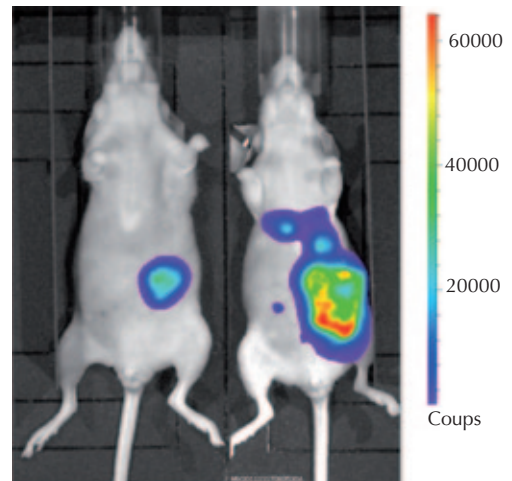


► Imagerie de bioluminescence

Le suivi de l'évolution du volume tumoral sur des animaux modèles a longtemps été un problème, dans la mesure où il impliquait leur sacrifice pour réaliser une mesure directe après ablation chirurgicale. Au cours de ces dernières années, les avancées de la bio-imagerie ont permis de pallier ce problème, avec un suivi non invasif et en temps réel grâce à l'Imagerie de BioLuminescence (IBL). Cette technique est maintenant utilisée dans de nombreux domaines tels que la thérapie cellulaire, l'infectiologie, la toxicologie ou la cancérologie. Elle permet la détection *in vivo* de cellules luminescentes sans apport de lumière extérieure, contrairement à l'imagerie de fluorescence. La bioluminescence naturelle la plus connue est sans doute celle de la luciole, dont la petite lumière émise dans la nuit a capté l'attention de tout un chacun. Cette bioluminescence est due à une réaction chimique, qui fait intervenir deux agents : la luciférine et la luciférase. La luciférase sert de catalyseur à l'activation de la luciférine, qui conduit à la formation d'une molécule oxydée dans un état excité. Sa désexcitation dissociative produit une émission de lumière. Cette lumière émise, même à l'intérieur du corps, peut être facilement détectée par les caméras de grande sensibilité actuellement disponibles.

L'imagerie de bioluminescence est ainsi réalisée à partir de cellules de greffons tumoraux de la lignée dite « luc » exprimant le gène de la luciférase, celui-là même de la luciole. La luciférine est ensuite injectée à l'animal au moment souhaité pour la mesure. L'émission de lumière est alors corrélée à l'activité tumorale. Son enregistrement permet donc de suivre *in vivo* l'évolution de tumeurs ou la progression de métastases (fig. E2).

encadré 2



E2. Images de bioluminescence d'une souris traitée par *Plasma Gun* (à gauche) et d'une souris contrôle (à droite), prises 37 jours après le greffage de la tumeur, dans le cadre des expériences sur le côlon (voir le texte et la figure 3). On peut noter l'absence de métastases dans le cas de la souris traitée par plasma, contrairement à la souris non traitée.



avec la chirurgie. Cela implique le développement d'outils endoscopiques intégrant des dispositifs du type *Plasma Gun*, au côté des instruments traditionnels d'intervention. Le champ de la médecine plasma est à présent ouvert. Il reste aux physiciens et aux ingénieurs un important travail à réaliser pour mettre en œuvre et optimiser des sources de plasma atmosphérique. ■

Ont participé à ce travail :

Laura Brulé, Sébastien Dozias, Claudine Kieda, Alain Le Pape, Stéphanie Lerondel, Jean-Michel Pouvesle, Delphine Riès, Éric Robert, Vanessa Sarron, Julien Sobilo, Marc Vandamme, avec le soutien du CNRS, des Universités d'Orléans et de Tours, de l'ANR, de la Région Centre, du Conseil Général du Loiret, du CHR d'Orléans et des entreprises INEL et Germitec.

(a) GREMI : Groupe de Recherches sur l'Énergétique des Milieux Ionisés, UMR 7344 CNRS.

CIPA-TAAM : Centre d'Imagerie du Petit Animal – Transgénèse et Archivage d'Animaux Modèles, UPS CNRS 44. CBM : Centre de Biophysique Moléculaire UPR CNRS 4301. CERB : Centre de Recherches Biologiques, 18800 Baugy. MPE : Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics, Garching, Allemagne.

(b) Espèces réactives de l'oxygène et de l'azote (respectivement ROS, Radical Oxygen Species, et RNS, Radical Nitrogen Species) : espèces chimiques rendues très réactives par la présence d'électrons de valence non appariés. D'origine exogène ou endogène, elles sont capables d'oxyder les protéines, l'ADN ou les lipides des membranes des cellules.

(c) Stress oxydatif : agression des constituants de la cellule, due à des radicaux libres oxydants.

(d) Angiogenèse : processus (normal ou pathologique) de croissance de nouveaux vaisseaux sanguins à partir de vaisseaux préexistants.

(e) Quelques exemples : Plasma Bioscience Research Center, Kwangwoon, Corée du Sud ; Drexel Plasma Medicine Lab, Philadelphie, USA ; Campus PlasmaMed, Greifswald, Allemagne ; Plasma Health Care, MPI, Garching, Allemagne.

(f) Travaux réalisés par le GREMI, associé au CIPA-TAAM et au CBM, dans le cadre du programme PLASMED.

(g) Une souris "nude" est une souris de laboratoire génétiquement modifiée, au système immunitaire inhibé, permettant le développement de tumeurs humaines greffées pour l'étude des traitements thérapeutiques.

En savoir plus

- *Plasma Processes and Polymers, Special Issue: Plasma Medicine*, 7, 3-4 (2010) 187-352.
- G. Isbary *et al.*, *British Journal of Dermatology*, 163 (2010) 78.
- É. Robert *et al.*, *Plasma Process and Polymers*, 6 (2009) 795.
- M. Vandamme *et al.*, *International Journal of Cancer*, 130 (2012) 2185.
- M. Laroussi *et al.*, *Applications of low temperature gas plasmas in medicine and biology*, Cambridge University Press (2012).

De nouveaux résultats indiquent que la particule découverte au CERN est un boson de Higgs

Extrait du communiqué de presse du CERN du 14 mars 2013

À la conférence de Moriond, les collaborations ATLAS et CMS auprès du Grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN ont présenté de nouveaux résultats préliminaires précisant encore les propriétés de la particule découverte l'année dernière (voir *Reflets* n°31, p. 17). Après avoir analysé deux fois et demie plus de données que ce qui était disponible au moment de l'annonce de la découverte, en juillet 2012, les chercheurs arrivent à la conclusion que la nouvelle particule ressemble de plus en plus à un boson de Higgs, cette particule liée au mécanisme qui donne une masse aux particules élémentaires.

La question reste toutefois ouverte de savoir s'il s'agit bien du boson de Higgs du Modèle standard de la physique des particules, ou plutôt du plus léger d'un ensemble de bosons prédits dans certaines théories au-delà du Modèle standard. Répondre à cette question prendra du temps.

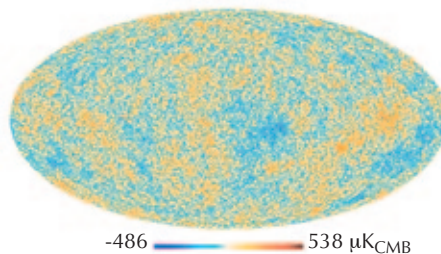
■ Pour en savoir plus :

<http://home.web.cern.ch/fr/about/updates/2013/03/new-results-indicate-new-particle-higgs-boson>

Planck dévoile une nouvelle image du Big Bang

Extrait du communiqué de presse du CNRS du 21 mars 2013

Lancé en 2009, Planck, le satellite de l'Agence spatiale européenne (ESA) dédié à l'étude du rayonnement fossile a livré les résultats de ses quinze premiers mois d'observations. Ils apportent une moisson de renseignements sur l'histoire et la composition de l'Univers : la carte la plus précise jamais obtenue du rayonnement fossile (fig. 1), la mise en évidence d'un effet prévu par les modèles d'inflation, une révision à la baisse du rythme de l'expansion de l'Univers, ou encore une nouvelle évaluation de la composition de l'Univers. Bon nombre de ces données ont été obtenues grâce au principal instrument de Planck, HFI, conçu et assemblé sous la direction de l'Institut d'astrophysique spatiale (CNRS/Université Paris-Sud), avec un financement du CNES et du CNRS.



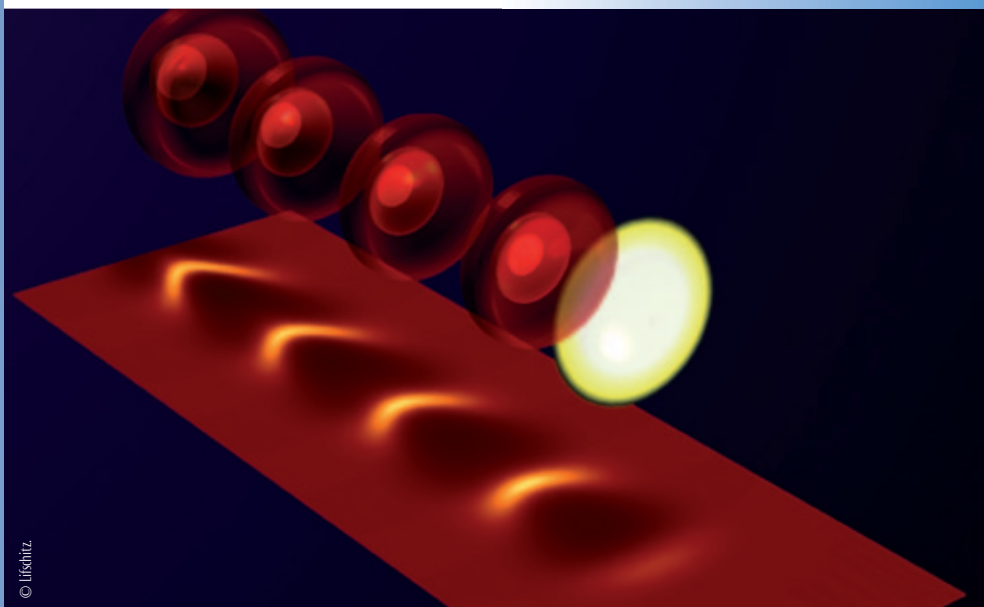
1. Carte de la température du rayonnement fossile sur tout le ciel, réalisée par la collaboration Planck à partir des données recueillies par les instruments HFI et LFI du satellite. L'échelle de couleur est en millièmes de degré : c'est l'écart par rapport à la température moyenne de $-270,425^{\circ}\text{C}$ mesurée par le satellite COBE en 1992.

■ Voir le communiqué de presse du CNRS :

www2.cnrs.fr/presse/communiqu/3039.htm

■ Plus d'informations sur :

www.planck.fr



© Hshitz.

Principe du sillage laser (simulation numérique) : l'impulsion laser (en jaune) excite dans son sillage l'onde plasma relativiste.

Accélérateurs à plasma laser : principes et applications

Victor Malka (victor.malka@ensta-paristech.fr), **Cédric Thauy**, **Sébastien Corde**, **Kim Ta Phuoc** et **Antoine Rousse**

Laboratoire d'optique appliquée, unité mixte de recherche du CNRS, de l'École Nationale Supérieure de Techniques Avancées et de l'École polytechnique, 91761 Palaiseau Cedex.

En transmettant, à des faisceaux d'électrons ou à des faisceaux de rayons X, les propriétés des impulsions lasers, les physiciens sont capables aujourd'hui de réaliser des accélérateurs à plasma compacts et compétitifs, délivrant des faisceaux de particules ou de rayonnement X très brillants.

Pour réaliser cette performance, il faut, d'une part, mettre en mouvement de façon collective les électrons du plasma, et, d'autre part, contrôler dans un très petit volume l'injection des particules à accélérer.

Les accélérateurs dits conventionnels

Les accélérateurs d'électrons sont utilisés dans de nombreux domaines, allant de la médecine à la physique des particules, en passant par la radiobiologie ou la physique de la matière condensée. Le marché annuel des accélérateurs industriels est évalué à quelques milliards d'euros. Les accélérateurs à usage fondamental pour la physique des hautes énergies et pour les sources de rayonnement X de 3^e et 4^e générations (synchrotrons et lasers à électrons libres) représentent un investissement du même ordre de grandeur.

Les accélérateurs modernes utilisent des ondes électromagnétiques radiofréquence (RF) pour accélérer des particules chargées à des vitesses relativistes. Développée depuis plus d'un demi-siècle, cette technologie a fait ses preuves : elle permet de produire de façon stable et robuste des faisceaux de particules d'excellente qualité. Dans un accélérateur, l'énergie des particules est proportionnelle au produit du champ électrique et de la distance sur laquelle on

l'applique. Or, le champ accélérateur dans ces cavités RF est limité à quelques dizaines de mégavolts par mètre : au-delà, les parois de la structure, ionisées par le champ électrique, commencent à être endommagées (phénomène de claquage). Cette limite du champ explique pourquoi les accélérateurs deviennent de plus en plus grands. Par exemple, le Grand Collisionneur de Hadrons (LHC) du CERN, près de Genève, qui mène avec succès sa quête du boson de Higgs [1], est un accélérateur circulaire aussi long que le boulevard périphérique de Paris. Son possible successeur pourrait être l'International Linear Collider (ILC), qui utilisera 16 000 cavités RF pour accélérer des électrons et des positrons à 250 gigaélectron-volts (GeV) sur 31 km, ou le Compact Linear Collider (CLIC), d'une longueur de 40 km, qui fera des collisions électrons-positrons à 3 téraélectron-volts (TeV).

La longueur des accélérateurs ne pouvant croître indéfiniment, on comprend toute l'importance de chercher des solutions alternatives compactes à l'accélération de particules.

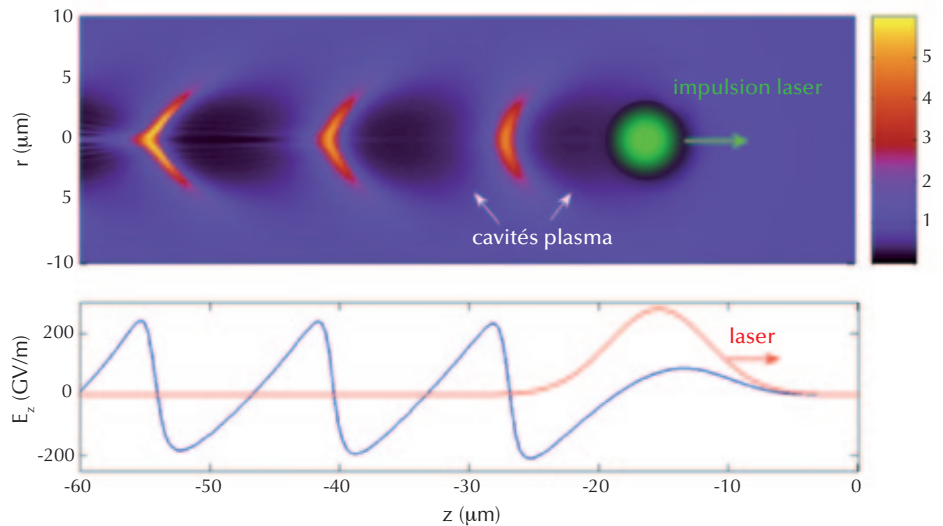
»»»



Les accélérateurs à plasma laser : des premiers petits pas au pas de géant

Sur la base de simulations numériques et de modèles théoriques, T. Tajima et J. Dawson suggéraient à la fin des années 1970 que, dans un plasma, des électrons pourraient être accélérés à une vitesse proche de celle de la lumière. Milieux ionisés, constitués d'électrons libres et d'ions, les plasmas peuvent, par nature, supporter des champs électriques mille à dix mille fois supérieurs à ceux utilisés dans les accélérateurs traditionnels ! Dans un plasma, la distance sur laquelle une particule doit être accélérée pour parvenir à une énergie donnée est donc considérablement réduite par rapport aux machines actuelles.

Au début des années 1990, la confirmation expérimentale a été apportée par une équipe américaine qui est parvenue, pour la première fois, à accélérer des électrons injectés dans un plasma. En 1995, en Grande-Bretagne, des faisceaux d'électrons de grande énergie, allant jusqu'à 44 mégaelectron-volts (MeV), ont été directement produits par une équipe anglo-franco-américaine, sans qu'une source extérieure de particules soit nécessaire. Quelques années plus tard, des résultats analogues ont été obtenus avec des lasers tout aussi puissants, mais d'une énergie et d'une taille beaucoup plus modestes, comme celui du Laboratoire d'optique appliquée (LOA) à Palaiseau. Dès 1999, la production de faisceaux d'électrons de 70 MeV a été démontrée avec ce laser compact. Puis en 2002, dans des ondes plasmas de très fortes amplitudes excitées dans le régime de sillage forcé, des faisceaux d'électrons d'énergie encore plus élevée (200 MeV) ont été obtenus [2]. En améliorant ce régime, une avancée notable a été réalisée en 2004 où, en même temps que deux autres équipes, aux États-Unis et en Grande-Bretagne, nous avons obtenu pour la première fois des faisceaux qui, par leurs qualités, s'approchaient de ceux délivrés par les machines traditionnelles, mais après une distance d'accélération de quelques millimètres seulement [3]. Plus récemment, en 2006, nous avons encore amélioré notre dispositif en éclairant le plasma avec deux impulsions laser : ce nouveau schéma d'accélérateur produit alors un faisceau d'électrons stable, et dont la charge et l'énergie peuvent être précisément contrôlées en jouant simplement sur les paramètres des impulsions laser [4].



1. **Onde plasma.** L'impulsion laser (en vert) crée une perturbation de densité électronique (figure du haut). Le profil du champ électrique associé à cette onde plasma relativiste est illustré sur la figure du bas.

Une brièveté de l'ordre de la femtoseconde [5], un courant crête de quelques kA, une dispersion en énergie de l'ordre du pourcent, et des énergies atteintes qui dépassent aujourd'hui le GeV, représentent les paramètres actuels des accélérateurs à plasma laser.

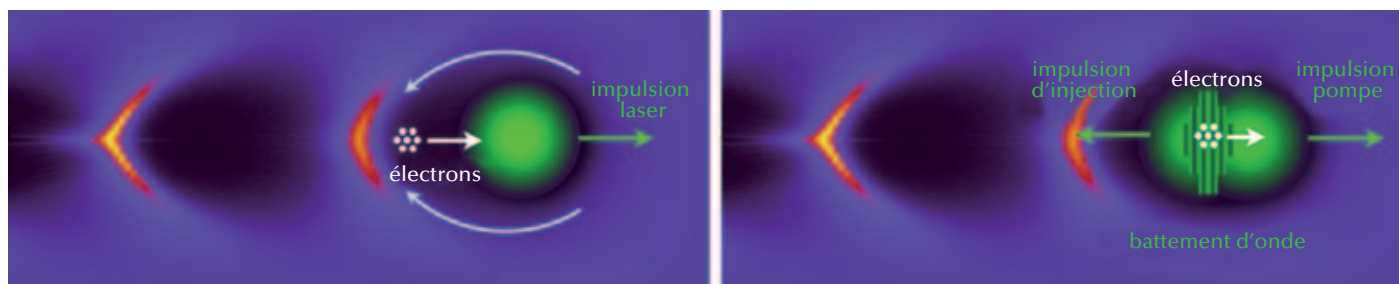
Comment ça marche ?

En focalisant une impulsion laser de forte puissance sur une cible gazeuse, le champ électrique gigantesque qui lui est associé arrache les électrons aux atomes constituant le gaz ; celui-ci passe alors immédiatement de son état initial gazeux à celui de plasma. Dans le plasma ainsi formé, la force pondéromotrice⁽¹⁾, qui est proportionnelle au gradient de l'intensité laser, agit comme une force de pression de radiation qui chasse les électrons hors du chemin de l'impulsion lumineuse. Plus lourds, les ions sont peu sensibles à cette pression, et restent immobiles pendant la durée du phénomène. La différence de répartition des charges électroniques et ioniques crée un champ électrique qui tend à ramener les électrons vers leurs positions d'origine. Les électrons se mettent alors à osciller vers l'avant puis vers l'arrière, avec une période directement liée à la densité initiale du milieu. Cette oscillation collective est appelée « onde plasma », et le champ électrique associé à ce mouvement constitue l'onde propagative nécessaire à l'accélération des électrons. Le schéma de principe est

illustré sur la figure 1. Si la durée de l'impulsion laser est de l'ordre de la période d'oscillation du plasma, le transfert d'énergie du laser vers l'onde plasma est optimal. Ce phénomène porte le nom de « sillage laser », par similitude avec un bateau qui crée une vague dans son sillage. Si cette vague (l'onde plasma) est d'une amplitude suffisante, des surfeurs (les électrons) peuvent s'en servir pour gagner de la vitesse. Ainsi, dans nos expériences, nous produisons de gigantesques « vagues » derrière l'impulsion laser, et nous nous en servons pour accélérer les électrons [6].

Une fois la structure accélératrice établie, il convient d'y injecter les électrons de façon externe avec un faisceau issu d'un accélérateur, ou de façon interne en piégeant certains des électrons du plasma. Les dimensions radiale et longitudinale de la structure accélératrice étant très petites, de l'ordre de la dizaine de microns, le défi à relever était de taille. Au cours des premières expériences, les ondes étaient amplifiées jusqu'à atteindre le déferlement. Les électrons étaient accélérés de façon plus ou moins aléatoire, et les faisceaux obtenus étaient de mauvaise qualité : les électrons se trouvaient animés de vitesses différentes, et accélérés dans des directions différentes.

Les résultats publiés dans *Nature* en 2004 [3] ont montré qu'en adaptant la densité électronique et la durée de l'impulsion laser⁽²⁾, un faisceau laser suffisamment intense pouvait créer une bulle plasma



2. À gauche, le régime de la bulle. L'impulsion laser (en vert) chasse les électrons de son passage, créant une bulle ionique ; les électrons circulent autour de la bulle avant d'être injectés sur l'axe du laser. La charge du paquet d'électrons croît jusqu'à atteindre la densité du plasma, le faisceau d'électrons écrante le champ de la bulle et l'injection s'arrête. Cette double localisation temporelle et spatiale de l'injection permet l'obtention de faisceaux d'électrons quasi monoénergétiques.

À droite, le régime de collisions d'impulsions laser. L'impulsion d'injection entre en collision frontale avec l'impulsion pompe qui a créé l'onde de sillage. Au cours de la collision, le chauffage de certains électrons dû au battement des deux ondes électromagnétiques associées à ces deux impulsions laser, permet l'injection ultérieure de ces électrons qui ont acquis une énergie suffisante pour être piégés.

capable de piéger localement des électrons (fig. 2 à gauche). Le caractère aléatoire du déferlement peut ainsi être évité : les électrons étant tous piégés au même endroit, ils acquièrent tous la même énergie lors de l'accélération.

En 2006, en réalisant l'injection par collision de deux impulsions laser (de même longueur d'onde), nous avons montré un contrôle encore plus précis des paramètres du faisceau d'électrons. Ici, une première impulsion laser (dite impulsion pompe) excite l'onde de sillage, puis une seconde impulsion laser (dite impulsion d'injection) qui se propage en sens inverse, entre en collision avec l'impulsion principale et chauffe très localement certains électrons du plasma au moment où les deux impulsions laser se recouvrent (fig. 2 à droite). Certains de ces électrons se trouvent alors injectés et accélérés dans l'onde de sillage, produisant ainsi un faisceau d'électrons de bien meilleure qualité. Plus important encore, en jouant de façon très simple sur les paramètres de ce deuxième faisceau laser – délai avec l'impulsion pompe, intensité ou polarisation – il est possible de contrôler la charge, l'énergie et la dispersion en énergie du faisceau de particules. Les ondes créées étant en outre de plus faible amplitude – car il n'est plus nécessaire désormais qu'elles déferlent spontanément – le processus d'injection est mieux maîtrisé et le faisceau produit est très reproductible.

D'autres schémas d'injection, utilisant des gradients de densité ou des mélanges gazeux ont aussi été explorés récemment ; ils montrent toutes les possibilités d'études et d'évolutions de ce domaine de recherche.

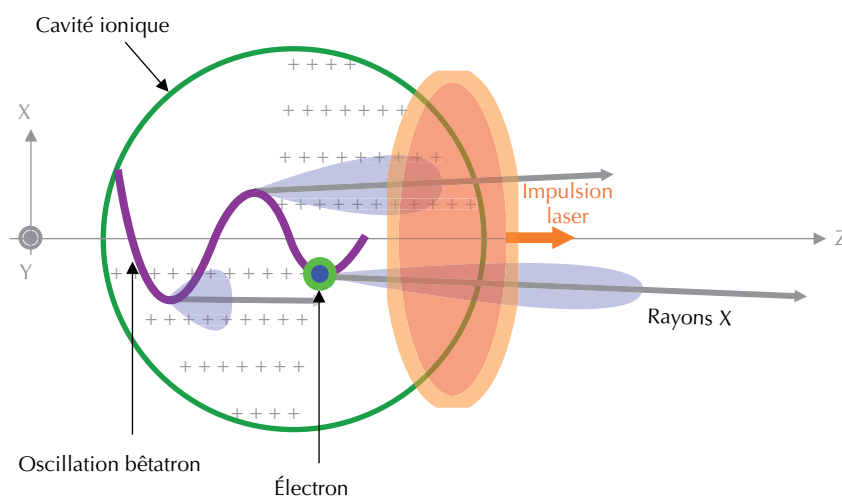
Des faisceaux X très brillants

Les oscillations des électrons relativistes, soit dans le champ électrique radial présent dans les accélérateurs à plasma laser, soit dans le champ électromagnétique du laser, ont permis de produire des flashes X très intenses par rayonnement « bêatron » dans le premier cas, et par rayonnement « Compton » dans le second cas.

Rayonnement bêatron

La figure 3 montre le principe d'émission du rayonnement bêatron. Au sein de la structure accélératrice, les électrons éjectés sous l'effet de la force pondéromotrice du laser se concentrent sur la surface d'une sphère, laissant son centre rempli d'ions. Le champ électrique longitudinal accélère les électrons vers l'avant, tandis que le champ

électrique radial renvoie les électrons qui sont injectés hors de l'axe vers le centre de la cavité (fig. 3). Ces électrons oscillent donc autour de l'axe de propagation de l'impulsion laser. La longueur d'onde des oscillations est de l'ordre de la centaine de microns, et l'amplitude transverse de l'ordre du micron. On appelle ces oscillations les « oscillations bêatron », ce qui a donné son nom à la source. Ce mouvement relativiste est responsable de l'émission de faisceaux de rayonnement. Il s'agit de rayonnement de charges en mouvement relativiste, directement comparable au rayonnement synchrotron. Les faisceaux de rayonnement bêatron produits actuellement sont peu divergents (environ 1 degré), contiennent des photons ayant une énergie de plusieurs dizaines de keV [7], et ont des brillances crête équivalentes à celles des synchrotrons.



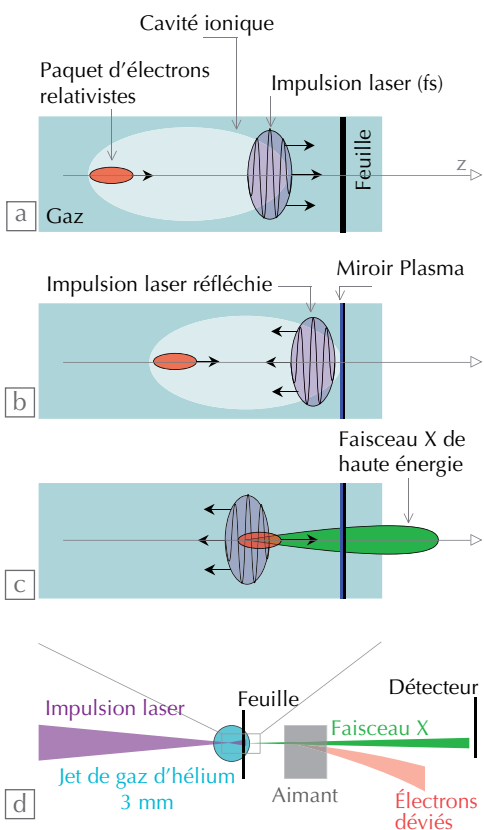
3. Rayonnement bêatron. Les électrons injectés en dehors de l'axe laser oscillent dans le champ électrique transverse et émettent du rayonnement X bêatron. Le faisceau X ainsi produit dans la direction du laser est ultra-bref et d'énergie atteignant quelques dizaines de keV pour des électrons de 300 MeV.



Rayonnement Compton

Si les électrons issus de l'accélérateur à plasma laser sont soumis au champ électromagnétique d'une impulsion laser intense contre-propagative, ils oscillent avec une longueur d'onde extrêmement courte, de l'ordre du micron, et émettent un rayonnement encore plus énergétique que dans le cas du rayonnement bêta-tron (fig. 4). On peut voir ce mécanisme de deux manières différentes, mais équivalentes. Soit on considère le laser comme un onduleur (jouant le même rôle qu'un onduleur de synchrotron) de longueur

d'onde micrométrique, soit on voit ce mécanisme comme de la diffusion Thomson/Compton, processus par lequel un électron absorbe un ou plusieurs photons et émet un photon. Lorsque les directions de propagation du laser et des électrons sont opposées, l'énergie du rayonnement émis peut facilement atteindre la gamme de la centaine de keV, et même s'étendre jusqu'à plusieurs MeV (rayonnement gamma). Du fait d'effets Doppler importants (d'une part sur la fréquence laser vue par les électrons et d'autre part sur le rayonnement qu'ils émettent mesuré dans le référentiel du laboratoire), l'énergie des photons émis est proportionnelle au produit de l'énergie des photons du laser par le carré de l'énergie des électrons. Ce mécanisme permet de produire des photons énergétiques en grand nombre. Dans l'expérience réalisée en 2012 au LOA [8], un schéma très simple a permis de réaliser une source 10 000 fois plus brillante que les sources conventionnelles existantes dans cette gamme d'énergie.



4. Diffusion Compton inverse. (a, b, c) Principe du phénomène. (d) Schéma de l'expérience.

- L'impulsion laser se propage dans un jet de gaz et crée une cavité ionique dans laquelle des électrons sont piégés et accélérés.
- L'impulsion laser, qui précède le paquet d'électrons, est ensuite réfléchi par une fine lame de verre placée après le jet de gaz. Elle entre alors en collision avec les électrons relativistes.
- Cette collision conduit à l'émission d'un faisceau intense de rayonnement Compton émis dans la direction de propagation du laser. La caractérisation de ce flash de rayonnement [8] a permis de mettre en évidence son spectre, qui s'étend du domaine X à celui du rayonnement gamma, sa taille de source, qui est micrométrique, et sa divergence, qui est de l'ordre du degré.

Applications et perspectives

Les applications des faisceaux d'électrons issus des accélérateurs à plasma laser [7] couvrent de nombreux domaines.

(i) En science des matériaux, ils peuvent être utilisés pour l'inspection non destructive de la matière. Nous avons développé pour cette application une source gamma (s'étendant jusqu'à plusieurs dizaines de MeV) utilisant le rayonnement de freinage produit lorsque les électrons traversent une cible (le convertisseur). Cette source permet l'imagerie d'hétérogénéités dans des objets denses avec une résolution spatiale inférieure à 50 microns.

(ii) En radiothérapie, les profils relativement homogènes de dose des faisceaux d'électrons de haute énergie (~ 200 MeV) pourraient permettre un traitement de certains cancers avec des performances plus intéressantes que les traitements actuels réalisés avec des sources X. Des expériences de radiobiologie ont permis de suivre les taux de survie et de réparation de cellules humaines irradiées par le faisceau d'électrons, et d'ouvrir ainsi une nouvelle approche pour l'étude des effets des rayonnements ionisants sur les tissus vivants.

Enfin, les nouvelles sources X, telles que les sources bêta-tron et Compton, viennent compléter cette liste d'applications, à laquelle il faudra ajouter dans le futur le

développement de lasers à électrons libres qui associeront accélérateurs laser plasma à des onduleurs, qu'ils soient classiques (c'est-à-dire comme ceux des synchrotrons, structures magnétiques périodiques), optiques ou plasma. Les sources X déjà produites sont extrêmement brillantes et ont permis d'obtenir des images par contraste de phase d'objets biologiques avec des résolutions de l'ordre du micromètre. Ultrabrèves (durée de l'ordre de la femtoseconde), elles autoriseront le suivi en temps réel des phénomènes ultrarapides pour les sciences du solide ou pour la biologie.

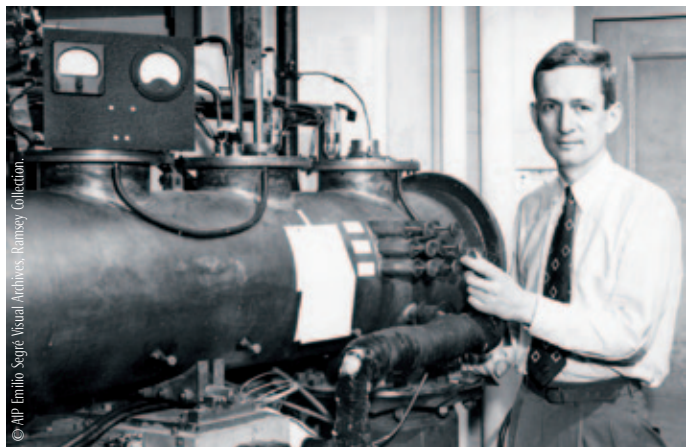
Concernant le futur de cette approche pour la physique des hautes énergies, les luminosités extrêmes exigées nécessiteront des développements importants, tant sur la technologie laser que sur la conception de schémas d'accélérateurs à multi-étages d'électrons et de positrons. Les puissances moyennes des faisceaux de particules requises (de l'ordre de quelques dizaines de MW) correspondraient, dans l'état actuel de nos connaissances et de la technologie laser, à des puissances électriques moyennes de l'ordre de quelques dizaines de GW. Le chemin à parcourir pour atteindre ces objectifs est donc pavé de nombreux défis qu'il nous faudra surmonter, ne rendant cette aventure qu'encore plus attrayante et excitante. ■

- La force pondéromotrice est une force non linéaire qu'une particule chargée subit dans un champ électromagnétique oscillant inhomogène.
- L'obtention du régime de la bulle nécessite d'avoir une impulsion laser de dimensions (longueur et largeur) inférieures à la longueur d'onde plasma.

Bibliographie

- L. di Ciaccio et G. Hamel de Monchenault, *Reflète de la physique* n°31 (2012), pp. 17-19.
- V. Malka *et al.*, *Science* **298** (2002) 1596.
- J. Faure *et al.*, *Nature* **431** (2004) 541 ; C. Geddes *et al.*, *Nature* **431** (2004) 538 ; S. Mangles *et al.*, *Nature* **431** (2004) 535.
- J. Faure *et al.*, *Nature* **444** (2006) 05393.
- O. Lundh *et al.*, *Nature Physics* **7** (2011) 219.
- V. Malka, J. Faure et E. Lefebvre, *La Recherche* n°38 (février 2010).
- V. Malka *et al.*, *Nature Physics* **4** (2008) 447.
- K. Ta Phuoc *et al.*, *Nature Photonics* **6** (2012) 308.

L'héritage de Norman Ramsey (1915-2011)



Norman Ramsey en 1952.

Norman Ramsey, prix Nobel de Physique 1989, décédé le 4 novembre 2011, a eu une grande influence sur le monde de la physique pendant toute la seconde moitié du 20^e siècle. À côté de ses travaux de chercheur en physique atomique et quantique, il s'est investi dans la politique de la science. Il a joué un rôle déterminant dans la fondation aux États-Unis des laboratoires nationaux de Brookhaven en 1947 et du Fermilab en 1967. En tant que premier conseiller scientifique de l'OTAN, il a introduit les bourses d'études postdoctorales et les écoles d'été, qui bénéficient toujours du soutien de l'OTAN.

La méthode des champs oscillants séparés pour la spectroscopie, qui lui valut le Nobel, n'est qu'une de ses contributions à la science parmi beaucoup d'autres. Avec Edward Purcell, il a lancé la recherche sur la brisure des symétries fondamentales qui se poursuit aujourd'hui. Il a poussé des études classiques sur les interactions magnétiques dans les molécules. De plus, il nourrissait un intérêt profond pour les mesures de précision et les horloges atomiques. Son invention du maser à hydrogène fait partie de sa citation pour le prix Nobel.

Norman Foster Ramsey naît le 27 août 1915. Après des études à l'université Columbia et deux années à Cambridge, il revient à Columbia rejoindre le groupe d'Isaac Rabi, sans tenir compte de l'avertissement de ce dernier : le domaine des jets moléculaires – celui de son groupe – est scientifiquement épuisé. Quelques mois plus tard, Rabi invente la méthode de résonance magnétique. Bien qu'encore débutant, Ramsey joue un rôle de premier plan en découvrant que la force nucléaire dépend du *spin*, ce qui donne une impulsion décisive à sa carrière. Durant la guerre, il travaille sur le radar et le projet atomique. En 1947, il est recruté comme professeur à l'université Harvard, où il restera jusqu'à sa retraite en 1987.

En 1950, tout en bataillant sur un appareillage de jet moléculaire à Harvard, il conçoit la méthode des « champs oscillants séparés », ce qui ouvre la faisabilité d'une

horloge atomique dans le domaine micro-onde. Quelques années plus tard, l'horloge atomique à césium est réalisée. La méthode dite de Ramsey est aujourd'hui appliquée dans de nombreux domaines, de la métrologie à l'information quantique, et bien sûr dans les horloges atomiques dont la dernière génération fonctionne aux longueurs d'onde optiques.

En 1950 également, Ramsey et Purcell remarquent qu'il n'y a aucune démonstration expérimentale de l'invariance de la force nucléaire quand on renverse la parité. Ensuite, Ramsey note la même lacune pour la symétrie dans le renversement du temps. Il démarre alors une recherche sur le moment dipolaire électrique du neutron, qui inspirera des recherches analogues sur la violation des symétries fondamentales. Aujourd'hui, la quête du moment dipolaire de l'électron revêt une importance primordiale en physique des particules.

À Harvard, Ramsey a dirigé 73 thèses et a donné des cours sur les jets moléculaires à des générations de physiciens. Contraint de prendre sa retraite en 1987, il a continué d'enseigner comme professeur invité dans de nombreuses universités et aux étudiants de première année à Harvard.

Norman Ramsey faisait invariablement une forte impression, du fait de sa chaleureuse personnalité et de son intérêt naturel pour ses étudiants et ses collègues. Il apportait un soin extrême à la clarté et à la précision de ses travaux scientifiques et une



attention égale à bien traiter ses concurrents. Les exemples de sa générosité et de son sens de l'intérêt collectif abondent. Par son exemple, il nous a donné des leçons d'intégrité scientifique au plus haut niveau, une partie essentielle de son héritage. ■

Daniel Kleppner⁽¹⁾

Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA

Traduction par Michèle Leduc

(1) Daniel Kleppner est professeur émérite au MIT et co-directeur du Center for Ultracold Atoms du MIT-Harvard. Il a fait sa thèse en physique atomique, soutenue en 1959, sous la direction de Norman Ramsey à Harvard. Il a mené au MIT avec Tom Greytak des recherches pionnières sur le gaz d'hydrogène atomique polarisé à basse température, qui ont abouti à sa condensation de Bose-Einstein en 1998. Il est lauréat de nombreux prix prestigieux, en particulier du prix Wolf de Physique en 2005.

Composition atmosphérique et bilan radiatif

Jean Poitou (jean.poitou@wanadoo.fr)

Ancien adjoint au directeur du Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement

Le climat de la Terre résulte de l'équilibre entre l'énergie solaire qu'elle absorbe et l'énergie qui repart vers l'espace sous forme de rayonnement infrarouge ; près de 90% de l'énergie sortante est émise par les couches supérieures de l'atmosphère, à une altitude qui croît avec la concentration des gaz à effet de serre (GES). La température de cette zone émettrice diminue avec l'altitude : l'accumulation de GES se traduit donc par une émission moindre d'infrarouges.

Le forçage radiatif – nom donné au déséquilibre ainsi produit – réchauffe toute la colonne atmosphérique. Les impacts complexes des aérosols provoquent d'autres forçages indirects, dont le bilan est un effet refroidissant. Les forçages d'origine anthropique dominent ceux d'origine naturelle, et sont en augmentation ininterrompue du fait de l'accumulation des GES dans l'atmosphère.

Au cours du dernier siècle, la température moyenne de la Terre a augmenté de 0,7°C. Cette augmentation peut paraître minime ; mais, d'une part, elle a été très rapide par rapport aux évolutions qu'a connu le climat dans les époques passées ; d'autre part, elle semble bien n'être que le prélude à un réchauffement nettement plus conséquent susceptible d'affecter la Terre pendant des millénaires. Le but de cet article est de comprendre comment l'accroissement de la concentration atmosphérique de gaz qui y sont présents à l'état de traces, peut perturber le bilan radiatif et par là le climat de la Terre, alors que les rayonnements infrarouges concernés sont déjà presque complètement absorbés par l'atmosphère. En d'autres termes, comment l'adjonction par l'homme de gaz à effet de serre augmente significativement et durablement l'effet de serre.

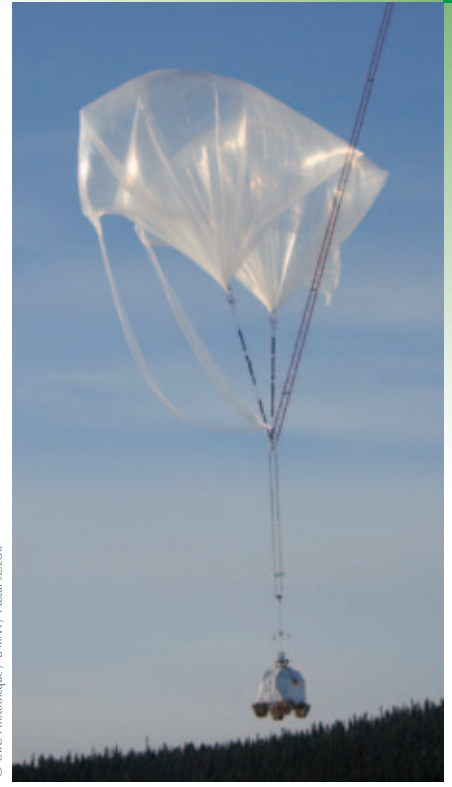
La Terre reçoit toute son énergie du Soleil^(a). Le Soleil a une température de surface de 5780 K. Il émet un rayonnement électromagnétique, essentiellement de corps noir, sauf aux courtes longueurs d'onde où d'autres processus d'émission entrent en jeu. Au niveau de la Terre, le flux lumineux

solaire est de 1360 W.m⁻² pour une surface perpendiculaire aux rayons du Soleil. Répartie à la surface du globe, en moyennant sur les cycles diurnes et saisonniers, cela donne un flux moyen de 340 W.m⁻².

Approximativement 30% de ce rayonnement incident est rediffusé vers l'espace, par l'atmosphère (diffusion par les molécules, par les nuages, par les aérosols) et par la surface du globe. Le reste, soit 70% du flux incident, est absorbé dans l'atmosphère ou par la surface du globe et converti en chaleur. La Terre (globe terrestre plus atmosphère) évacue la chaleur sous forme de rayonnement électromagnétique, le seul processus possible de transfert d'énergie vers l'espace, par rayonnement de corps noir. Les conditions climatiques s'ajustent pour réaliser un bilan énergétique, énergie entrante moins énergie sortante, nul en moyenne. Avec un flux de rayonnement incident de 340 W.m⁻² et un albédo^(b) de 30%, la loi de Stefan-Boltzmann^(c) donne $T = 255$ K, soit - 18°C, une température nettement inférieure à la température moyenne de surface du globe, qui est actuellement de 288 K, soit + 15°C. Cette différence de température résulte de l'effet de serre^(d).

Composition de l'air. Les pourcentages des gaz autres que la vapeur d'eau sont donnés pour l'air sec. En violet, les gaz qui absorbent des infrarouges. tableau 1

Gaz	Formule chimique	Abondance (volume) en %
Azote	N ₂	78,08
Oxygène	O ₂	20,95
Vapeur d'eau	H ₂ O	0 à 4 (dépend de la température)
Argon	Ar	0,93
Dioxyde de carbone	CO ₂	0,039
Néon	Ne	0,0018
Hélium	He	0,0005
Méthane	CH ₄	0,00017
Krypton	Kr	0,0001
Xénon	Xe	0,00008
Hydrogène	H ₂	0,00005
Oxyde nitreux	N ₂ O	0,00003
Ozone	O ₃	0,000004



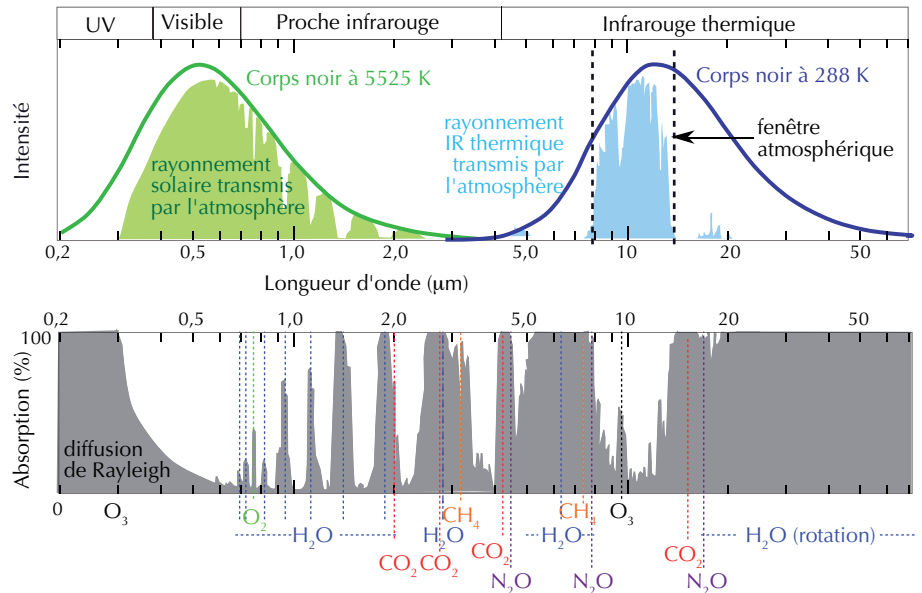
© CNRS Photothèque / LPMAA / Pascal JESECK

L'expérience SWIR-ballon du LPMAA (UMR 7092 CNRS-UP6) sur l'aire de lancement à Kiruna en Suède. L'instrument scientifique principal est un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier, pour mesurer le rayonnement solaire diffusé par les molécules de l'atmosphère. Le but de cette expérience est de déterminer les concentrations de deux gaz à effet de serre, le dioxyde de carbone (CO_2) et le méthane (CH_4).

L'effet de serre atmosphérique^(e)

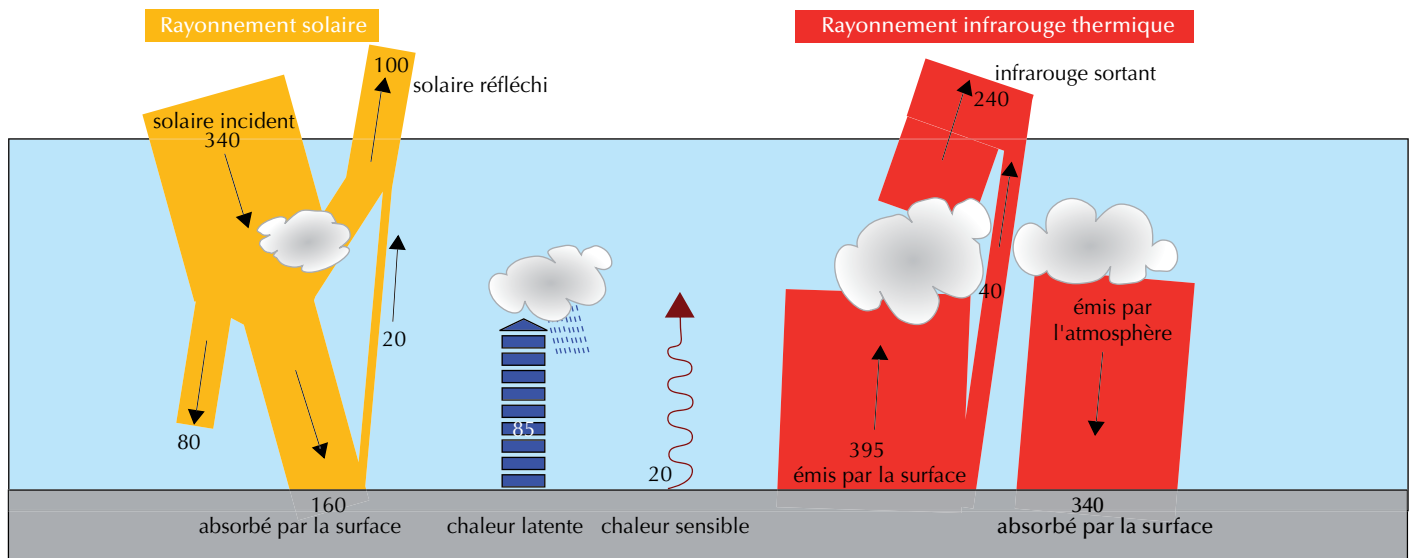
Les informations nécessaires pour comprendre le fonctionnement de l'effet de serre sont présentées dans le tableau 1 et la figure 1. L'atmosphère est composée essentiellement d'azote et d'oxygène, mais aussi d'un certain nombre de gaz à l'état de traces (tableau 1) qui présentent des raies d'absorption, essentiellement des modes de vibration, dans la gamme de longueurs d'onde de l'infrarouge thermique, c'est-à-dire au-delà de $2,5 \mu\text{m}$. C'est le cas des molécules dissymétriques et de celles constituées de trois atomes ou plus.

Du point de vue spectral, la lumière venant du Soleil s'étend de l'ultraviolet au proche infrarouge. Une part appréciable des courtes longueurs d'onde du spectre solaire est absorbée par l'ozone dans la stratosphère ou affectée par la diffusion de Rayleigh, diffusion de la lumière sur les molécules du gaz, dont l'amplitude varie comme λ^{-4} (λ est la longueur d'onde). En l'absence de nuages et d'aérosols, l'atmosphère est transparente pour la plus grande partie du reste du spectre solaire dans le visible et le proche infrarouge, comme le montre la figure 1.



1. Spectres d'émission et d'absorption par l'atmosphère du rayonnement solaire et du rayonnement émis par le sol terrestre, en l'absence de nuages et d'aérosols. En haut : en vert, spectre d'émission du corps noir proche du spectre d'émission du Soleil, et la fraction atteignant la surface terrestre après traversée de l'atmosphère ; en bleu, spectre d'émission à 288 K, température moyenne de la surface terrestre, et la fraction qui ressort dans l'espace ; noter la « fenêtre atmosphérique » autour de $10 \mu\text{m}$.

En bas : absorption par la colonne atmosphérique du rayonnement émis au niveau du sol. Les domaines de contributions des principaux gaz naturellement présents dans l'atmosphère sont indiqués sous la figure pour le domaine de longueurs d'ondes du rayonnement solaire et du rayonnement thermique terrestre. L'atmosphère piège aussi une partie du rayonnement aux courtes longueurs d'onde à cause de la diffusion de la lumière par les molécules (diffusion de Rayleigh).



2. Représentation schématique des échanges d'énergie entre la Terre, l'atmosphère et l'espace. L'épaisseur des bandes rouges et jaunes est représentative des flux en jeu, indiqués par les flèches et exprimés en $W \cdot m^{-2}$. Le flux de $40 W \cdot m^{-2}$ (bande rouge) qui va directement vers l'espace correspond à la « fenêtre atmosphérique ».



Pour une grande part des longueurs d'onde du rayonnement thermique émis par la Terre (au-delà de $2,5 \mu m$), l'atmosphère est opaque (l'absorption est dite « saturée »), sauf essentiellement dans un domaine de longueurs d'onde restreint, entre 8 et $14 \mu m$, la « fenêtre atmosphérique », bien visible sur la figure 1, qui est utilisée pour les observations spatiales de la Terre, par exemple par les satellites météorologiques.

Quels sont les processus en jeu ? La figure 2 montre de façon schématique l'ensemble des échanges de chaleur entre l'espace, la surface terrestre et l'atmosphère. Les échanges de chaleur entre la Terre et l'atmosphère ne se limitent pas aux échanges radiatifs. Comme le montre la figure 2, la surface du globe transmet de la chaleur à l'atmosphère par rayonnement, mais aussi sous forme de chaleur sensible (la chaleur que nous ressentons, transmise par conduction ou transportée par convection), et surtout de chaleur latente, émise principalement au-dessus des océans.

L'atmosphère étant absorbante pour le rayonnement, elle est aussi émettrice, conformément à la loi de Kirchhoff qui stipule que tout corps qui est absorbant pour un rayonnement électromagnétique est également émetteur de ce même rayonnement. L'atmosphère émet donc du rayonnement infrarouge et elle le fait dans toutes les directions. La moitié descend vers la surface du globe et sera absorbée par l'atmosphère et la surface ; l'autre moitié se dirige vers l'espace. Tant que la quantité de gaz à effet de serre située au-dessus du point d'émission est suffisamment importante, tout le rayonnement ascendant

émis au sein de l'atmosphère est à son tour absorbé. Ne sortira de l'atmosphère que le rayonnement émis à une altitude telle qu'il ne rencontre plus une quantité de gaz à effet de serre suffisante pour l'absorber complètement. Pour une concentration donnée de gaz à effet de serre, on peut définir une altitude effective d'émission, qui est celle à laquelle sera émis, en moyenne, le rayonnement qui partira vers l'espace. Cette altitude effective va croître avec la concentration en gaz absorbants. Il faut garder en tête que, alors que les gaz comme le CO_2 ou le CH_4 sont bien mélangés, la vapeur d'eau se trouve majoritairement à basse altitude. Ce sont donc essentiellement ces gaz bien mélangés qui vont déterminer l'altitude effective d'émission.

L'intensité du rayonnement émis par l'atmosphère est conditionnée par le profil vertical de température, décroissante avec l'altitude. Le flux d'énergie émis variant, selon la loi de Stefan-Boltzmann, comme la puissance 4 de la température absolue, l'intensité du rayonnement émis décroît sensiblement avec l'altitude d'émission. Ce qui sort des couches supérieures de l'atmosphère vers l'espace ne représente que 60% de ce que la surface émet sous forme de rayonnement infrarouge et moins de 50% de l'énergie totale qui quitte la surface. Le bilan radiatif à la surface est fermé grâce à la fraction descendante du rayonnement infrarouge émis par l'atmosphère (fig. 2).

Que se passe-t-il quand la concentration de gaz absorbant varie (fig. 3) ? Prenons le

cas du CO_2 qui est bien mélangé dans l'atmosphère ; l'augmentation de la concentration de CO_2 est la même sur toute la hauteur de la troposphère. L'altitude effective varie de façon à ce que la quantité intégrée de CO_2 au-dessus de cette altitude reste constante. En l'absence de réaction du climat, on aurait donc émission à une température plus basse et donc un flux d'énergie sortante moindre ; le déséquilibre ainsi créé est appelé **forçage radiatif**. Le rétablissement de l'équilibre radiatif implique que le flux d'énergie émis reste le même, ce qui veut dire que la température de la nouvelle zone émettrice, à plus haute altitude, doit être la même que celle de l'ancienne zone émettrice. L'adjonction de CO_2 n'affecte pas les conditions de stabilité verticale de l'atmosphère, le gradient thermique est conservé. Il faut donc que la température de toute la colonne atmosphérique augmente avec la concentration des gaz à effet de serre, y compris au voisinage de la surface. C'est une conséquence du caractère saturé de l'absorption ; quand la concentration est assez basse pour que l'absorption soit loin d'être saturée, l'adjonction de gaz absorbant fait, conformément à la loi de Kirchhoff, que la température décroît, ce qui est le cas dans la stratosphère.

Le calcul quantitatif de l'effet de serre est évidemment plus complexe que cette explication avec les mains. Il fait appel aux lois de la thermodynamique et aux interactions des molécules avec le rayonnement. Un des résultats de ce calcul est le pouvoir de réchauffement global des différents gaz (voir encadré 1).

Le forçage radiatif

Dans une situation d'équilibre du climat, le flux d'énergie entrante, provenant du Soleil, est égal au flux d'énergie sortante, composée de la fraction d'énergie entrante qui est rétrodiffusée et du rayonnement infrarouge émis par la Terre, surface + atmosphère. Une perturbation qui modifie l'un des deux flux : variation de la luminance solaire, altération de la transparence de l'atmosphère, modification de l'albédo terrestre... va rompre cet équilibre comme on vient de le voir dans le cas d'ajout de gaz à effet de serre. On désigne sous le nom de forçage radiatif le déséquilibre sur le bilan énergétique : [flux entrant] - [flux sortant], provoqué par une modification de l'environnement avant que le climat ait réagi pour rétablir l'équilibre.

Depuis la révolution industrielle, l'homme injecte dans l'atmosphère des quantités massives de dioxyde de carbone (34 milliards de tonnes en 2011) et d'autres gaz à effet de serre. L'évolution du forçage lié aux principaux gaz injectés par l'homme dans l'atmosphère est portée sur la figure 4. La tendance quasi linéaire pour le CO₂ en coordonnées logarithmiques indique en fait une augmentation exponentielle du forçage résultant d'une augmentation quasi continue des émissions, comme le montre l'histogramme du bas de la figure 4. La situation n'est pas la même pour tous les gaz à effet de serre émis par l'homme. Le méthane a peu augmenté dans la dernière décennie, mais semble repartir à la hausse. Les émissions de gaz industriels comme les chlorofluorocarbures ont fortement progressé à partir des années 1940 ; le protocole de Montréal destiné à protéger la couche d'ozone a donné un sérieux coup de frein à leur augmentation, mais les gaz destinés à les remplacer sont aussi de puissants gaz à effet de serre ; ces divers gaz ont des bandes d'absorption dans la « fenêtre atmosphérique ».

L'ensemble des forçages par rapport à la situation en 1750 est porté sur la figure 5. On distingue le forçage radiatif tel que décrit ci-dessus, et le forçage ajusté, qui, prenant en compte l'évolution des agents forçants considérés et leur impact sur la physique de l'atmosphère, donnent une meilleure évaluation de l'effet radiatif induit pas ces agents (voir encadré 2, p. 33). Cette figure montre l'importance prédominante des gaz à effet de serre par rapport à tous les autres forçages. Il faut remarquer l'effet refroidissant des aérosols (fines particules



Pouvoir de réchauffement global (PRG)

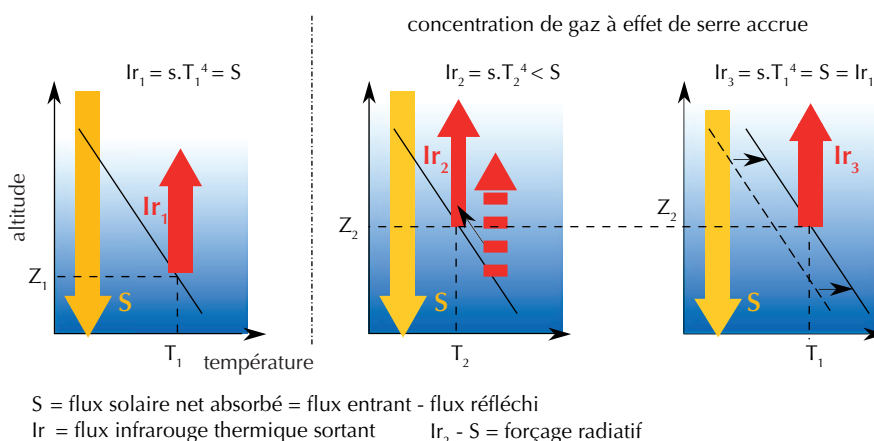
encadré 1

Pour comparer l'action des différents gaz à effet de serre, on a introduit le concept de pouvoir de réchauffement global. Partant de l'atmosphère actuelle prise comme référence, on y ajoute différents gaz à effet de serre. L'adjonction aujourd'hui d'une masse M de CO₂ va conduire dans n années à un réchauffement cumulé R . Si, au lieu de CO₂, on ajoute la même masse d'un autre gaz G , le réchauffement obtenu sera R' . Le rapport R'/R est le PRG du gaz G à l'échéance de n années. Dans les rapports du GIEC, n est égal à 100 ans.

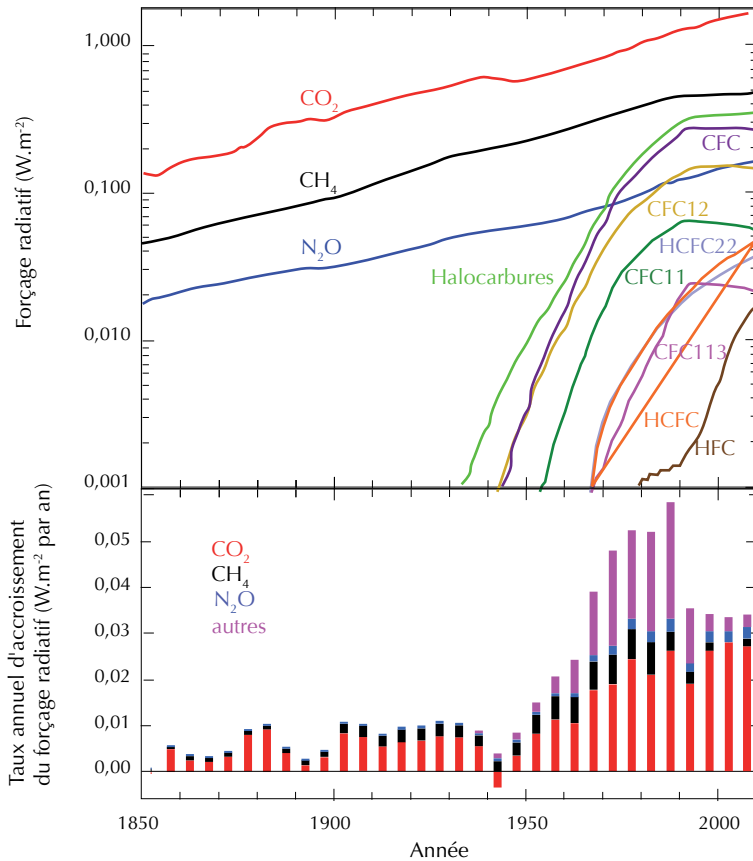
Le temps de résidence d'un gaz injecté dans l'atmosphère conditionne fortement son PRG. Ainsi, la vapeur d'eau qui ne séjourne qu'une quinzaine de jours dans l'atmosphère avant d'être éliminée par précipitation a un PRG négligeable. Le méthane, dont la durée de vie avant oxydation par les radicaux OH de l'atmosphère est d'une dizaine d'années, aura un PRG d'autant plus important que l'échéance considérée sera plus proche, le CO₂ produit ayant un pouvoir instantané beaucoup plus faible que le méthane.

Le tableau donne les temps de résidence et les PRG de divers gaz à effet de serre produits par l'homme. Ces PRG sont calculés par les codes de transfert radiatif dans l'atmosphère.

Gaz	Temps de résidence (ans)	PRG à 20 ans	PRG à 100 ans	PRG à 500 ans
Dioxyde de carbone : CO ₂	> 1 siècle	1	1	1
Méthane : CH ₄	12	72	25	7,6
Oxyde nitreux : N ₂ O	114	289	298	153
CFC-11 : CCl ₃ F	45	6730	4750	1620
CFC-115 : CClF ₂ CF ₃	1700	5310	7370	9990
HCFC-22 : CHClF ₂	12	5160	1810	549
HFC-23 : CHF ₃	270	12 000	14 800	12 200
Hexafluorure de soufre : SF ₆	3200	16 300	22 800	32 600
Trifluorure d'azote : NF ₃	740	12 300	17 200	20 700
PFC-14 : CF ₄	50 000	5210	7390	11 200



3. Effet sur le bilan radiatif et le climat d'un accroissement de la concentration atmosphérique de Gaz à Effet de Serre (GES). L'intensité du bleu symbolise la concentration volumique du GES ; l'épaisseur des flèches symbolise le flux d'énergie. La ligne continue noire représente la variation de température de l'atmosphère avec l'altitude. Partons d'un climat à l'équilibre (à gauche). Le rayonnement qui sort de l'atmosphère est émis à l'altitude Z_1 à une température T_1 . Ajoutons du GES (figure du milieu). La quantité de GES au-dessus de Z_1 est trop grande pour que le rayonnement puisse sortir. Le rayonnement sortant est émis à Z_2 . Du fait du gradient thermique vertical de l'atmosphère, la température T_2 est plus faible que T_1 et par conséquent le flux d'énergie émis est plus faible. Il y a déséquilibre entre le rayonnement entrant et le rayonnement sortant. On a donc accumulation de chaleur et, du fait du gradient thermique qui n'est pas affecté par la présence de GES, toute la colonne atmosphérique se réchauffe pour rétablir l'équilibre (à droite).

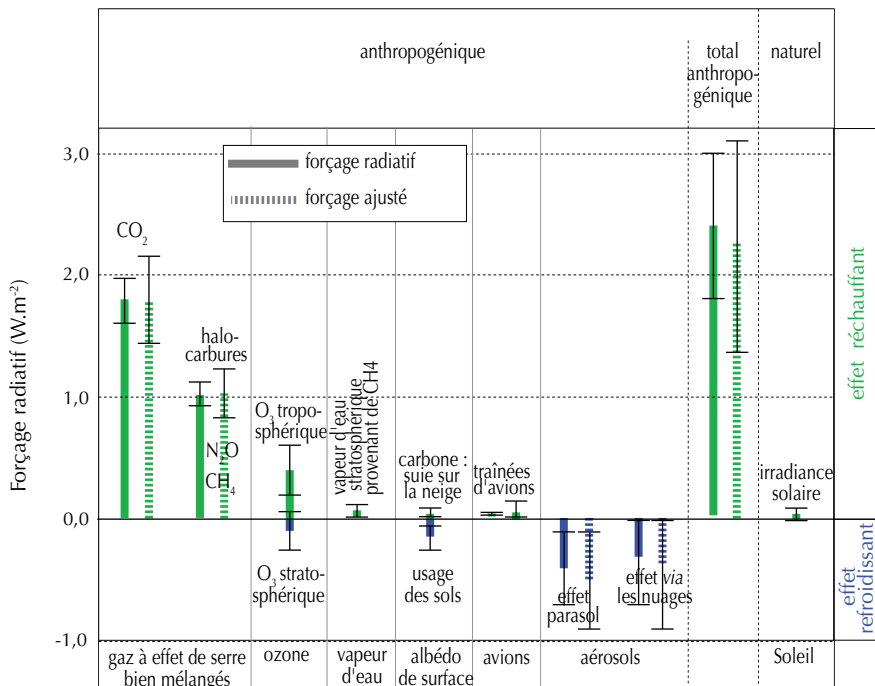


4. Évolution depuis 1850 du forçage induit par les différents gaz à effet de serre produits par l'homme. En haut : forçage en coordonnées logarithmiques. En bas : taux annuel d'accroissement du forçage.



en suspension dans l'atmosphère), particulièrement marqué même s'il est entaché d'incertitudes appréciables, et grâce auquel la température moyenne de la Terre n'a encore augmenté que modestement (0,7°C en un siècle) ; c'est en quelque sorte un effet bénéfique de la pollution, par ailleurs délétère pour la santé. On notera aussi sur la figure 5 la faiblesse du forçage lié à l'irradiance solaire dont les variations d'un cycle solaire de 11 ans à l'autre sont minimales – 0,1 W.m⁻² hors de l'atmosphère, 0,0175 W.m⁻² au sol – et très faibles par rapport au forçage anthropique ; les variations de cette irradiance au cours du cycle solaire, dix fois plus élevées, sont sans effet sur la tendance à long terme de la température moyenne globale.

Comment a évolué le forçage depuis 1750 ? C'est ce qui est montré sur la figure 6 pour chacune de ses composantes. Se superposant aux forçages produits par l'action de l'homme, on note une contribution minimale du Soleil. Mais un des effets les plus frappants est le fort refroidissement produit par les éruptions volcaniques majeures : les particules injectées dans la stratosphère forment un écran aux rayons solaires incidents et provoquent un refroidissement, comme celui qui a suivi l'éruption du Pinatubo en 1991 et qui a provoqué une baisse de température moyenne d'un demi-degré pendant deux ans.



5. Les diverses composantes du forçage radiatif (barres pleines), et du forçage ajusté (voir encadré 2) en barres tiretées, pour la situation en 2011 par rapport à la situation en 1750 prise comme référence.

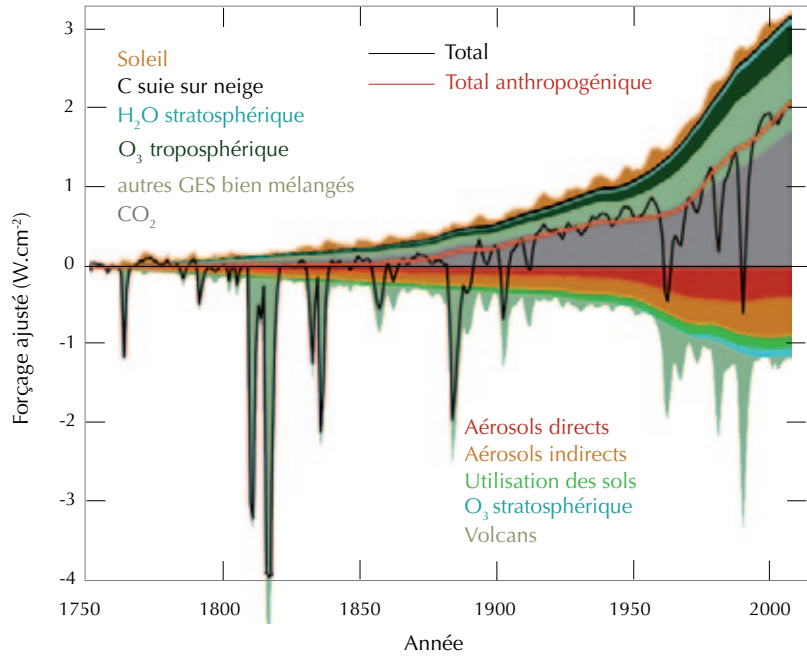
Pour en savoir plus

- J.L. Dufresne et J. Treiner, « L'effet de serre atmosphérique : plus subtil qu'on ne le croit ! », *La Météorologie*, n° 72 (février 2011), p. 31.
- C. Jeandel et R. Mosseri, *Le Climat à découvert*, CNRS Éditions (2011).
- S. Solomon et al. (eds.), *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press (2007).
Le rapport peut être téléchargé sur le site du GIEC : www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html
- Nous recommandons au lecteur de se reporter, dès sa sortie, au prochain rapport du GIEC, le *Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, dont la parution est prévue en 2013 et qu'on trouvera alors sur le site du GIEC (<http://www.ipcc.ch/>).
- Un livre très didactique : M.A. Mélières et C. Maréchal, *Climat et société*, édité par le CRDP de l'académie de Grenoble (2010).

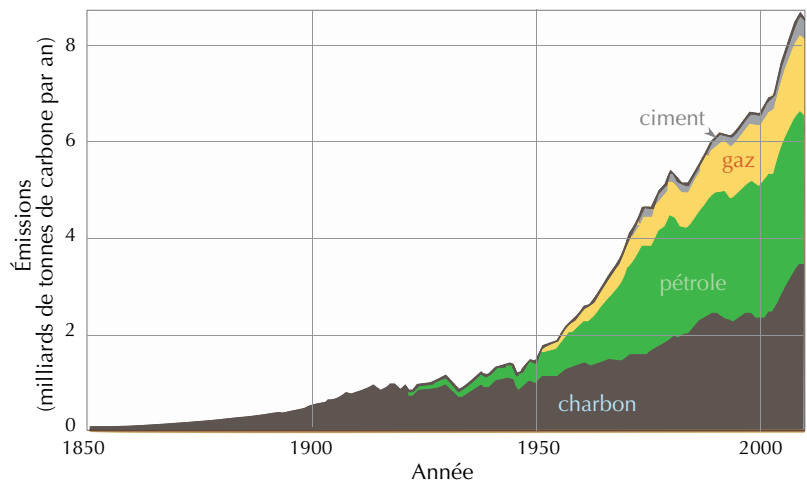
Conclusion

Bien qu'étant présents à des concentrations très faibles dans l'atmosphère, les gaz à effet de serre jouent un rôle fondamental dans l'établissement de la température moyenne à la surface du globe ; un accroissement de leur concentration se traduit automatiquement par une élévation de cette température. Les incertitudes sur les forçages, qui concernent principalement les aérosols et les nuages, ne remettent pas en cause l'impact majeur des gaz à effet de serre sur le réchauffement en cours. La poursuite de l'accumulation de ces derniers dans l'atmosphère conduit à un réchauffement inéluctable de la planète. Il est de ce fait particulièrement inquiétant que les émissions de carbone dans l'atmosphère ne cessent de croître : comme le montre la figure 7, chaque nouvelle source de CO₂ s'est globalement toujours ajoutée aux précédentes, sans jamais s'y substituer. Pour continuer à couvrir nos divers besoins d'énergie, il est urgent de mettre en œuvre des substituts non carbonés mais ayant une souplesse d'emploi comparable aux combustibles fossiles. ■

- (a) Le flux géothermique ne fait que 0,17 % du flux solaire.
- (b) L'albédo est la fraction du rayonnement incident qui est réfléchi.
- (c) Selon la loi de Stefan-Boltzmann, le flux F émis par un corps à la température T est : $F = \sigma T^4$, avec $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$.
- (d) Pour qu'en l'absence d'effet de serre la température de la Terre soit de -18°C , il faudrait qu'il n'y ait pas d'atmosphère mais que l'albédo planétaire, dû pour une part notable aux nuages, reste le même.
- (e) Le terme, dû à Arrhenius, est un peu mal choisi : une serre fonctionne par confinement de l'air chaud à l'intérieur de l'enceinte, alors que l'effet de serre est un confinement du rayonnement infrarouge.



6. Évolution des diverses composantes du forçage depuis 1750.



7. Part des différentes émissions mondiales de carbone (hors changement d'utilisation des sols) depuis 1850.

► Aérosols et forçage radiatif

encadré 2

Tel qu'on l'a défini, le **forçage radiatif** est un effet instantané. Du fait de ce forçage, la machine climatique va réagir et adapter le climat pour restaurer l'équilibre. Mais ce processus n'est évidemment pas instantané, compte tenu des temps caractéristiques de réponse des différents compartiments de l'environnement terrestre, au cours duquel l'agent forçant peut évoluer et avoir des impacts indirects par action sur d'autres composantes du système climatique. Cela peut se traduire, après un délai plus ou moins long, par d'autres effets radiatifs s'ajoutant ou se retranchant au forçage initial.

Prenons l'exemple des aérosols, ces particules en suspension, dans l'atmosphère. Dès sa formation, l'aérosol exerce une action sur le rayonnement, par diffusion de Mie (diffusion de la lumière par les particules) et, pour certains aérosols par absorption du rayonnement ; il s'agit d'un effet radiatif direct. Mais l'absorption de la lumière par un aérosol absorbant va chauffer localement l'atmosphère et en perturber la dynamique. De plus, les particules en suspension sont aussi des noyaux sur lesquels la vapeur d'eau va se condenser pour former les nuages dont l'aérosol va conditionner les propriétés optiques et le temps de résidence dans l'atmosphère (cet effet indirect est la cause majeure de l'effet refroidissant des aérosols).

Pour tenir compte de tous ces effets et de leur impact sur le bilan radiatif, les climatologues ont introduit un nouveau concept : le **forçage radiatif ajusté**, qui est le bilan des effets radiatifs immédiats et des effets radiatifs différés induits par la présence de l'agent forçant, l'aérosol dans notre exemple.

Des chercheurs en herbe à l'école Boucicaut

Évelyne Fillon⁽¹⁾, Maud Lebreton⁽²⁾, Béatrice Madignier⁽²⁾, Valérie Polge⁽³⁾
et Yves Noat⁽⁴⁾ (yves.noat@insp.jussieu.fr)

(1) Ancienne directrice de l'école élémentaire Boucicaut

(actuellement directrice de l'école primaire Littré, 6 rue Littré, 75006 Paris).

(2) Professeures des écoles à l'école élémentaire Boucicaut, 78 rue de la Convention, 75015 Paris.

(3) Ancienne professeure des écoles à l'école élémentaire Boucicaut

(actuellement à l'école élémentaire 188 rue d'Alésia, 75014 Paris).

(4) Chercheur au CNRS, Institut des Nanosciences de Paris, 4 place Jussieu, 75005 Paris.

Ce texte est le témoignage d'une expérience pédagogique menée à l'école élémentaire Boucicaut, située dans le 15^e arrondissement de Paris, dans les murs de l'ancien hôpital Boucicaut. Pendant plusieurs années, de 2004 à 2010, sous l'impulsion d'un petit groupe d'enseignants et d'un physicien du CNRS, de jeunes élèves du CP au CM1 sont devenus de véritables chercheurs en herbe et ont expérimenté un apprentissage de la science créatif et non scolaire.

Ces ateliers s'inscrivent dans la lignée d'autres initiatives de ce type, telle que celle de l'association « La main à la pâte », lancée par le prix Nobel de physique 1996 G. Charpak.

L'expérience décrite dans cet article est d'abord née d'un hasard : la proximité géographique d'un laboratoire de recherche et d'une école. En effet, tout a débuté à la suite du déménagement – pour cause de désamiantage – du laboratoire de recherche en physique de la matière condensée, du grand campus de Jussieu situé dans le Quartier latin, vers le 15^e arrondissement de Paris, dans l'ancien hôpital Boucicaut.

Un jour, un chercheur du CNRS est venu proposer ses services à la directrice de l'école, pour enseigner les sciences dans une de ses classes. Ainsi ont débuté les ateliers sciences à l'école élémentaire Boucicaut, qui ont fonctionné – avec trois professeurs des écoles différentes – pendant six années scolaires consécutives, de septembre 2004 à juin 2010.

La science expérimentale a-t-elle sa place au sein de l'école ? Quel rôle peut-elle y jouer ? Voici les questions que nous nous sommes posées au terme de ces années d'ateliers et auxquelles nous tentons ici de donner des éléments de réponse.

L'esprit de la démarche

« La joie de contempler et de comprendre, voilà le langage que me porte la nature » nous dit Einstein [1]. Le scientifique est dans une perpétuelle quête d'une meilleure compréhension de la nature. En ce sens, la science s'apparente à l'art et son apprentissage, comme celui d'un instrument de musique ou de la peinture, nécessite une

pratique assidue sur une longue durée. Ainsi, c'est au travers d'un travail de fond que le goût pour la science a la plus grande chance de naître et de se développer.

Pour cette raison, plutôt que d'intervenir ponctuellement dans des classes, nous avons décidé de suivre une seule et même classe durant une ou deux années scolaires consécutives, et de mettre en place des ateliers dans un esprit proche de celui de la recherche, telle qu'on la trouve dans les laboratoires de physique.

Le cadre des ateliers

Au début, nous avons prévu de faire une séance tous les quinze jours. Mais en pratique, un rythme d'une fois par semaine – quand cela était possible – s'est révélé beaucoup plus productif. En effet, nous nous sommes vite rendus compte que des séances trop espacées nuisaient à la continuité de la pensée, nécessaire dans cette démarche.

La première année, grâce à la présence de locaux inoccupés, nous disposions d'une salle où nous pouvions laisser en place nos expériences en cours. Cette situation était idéale pour des raisons pratiques évidentes, mais aussi parce que le changement de lieu facilite à bien des égards l'accès à un autre espace, celui de la création.

Il a été très vite clair que nous ne souhaitions pas intervenir en tant que « professeur », souvent perçu par les élèves comme « celui qui sait », mais plutôt en tant que « chercheur



L'école élémentaire Boucicaut en décembre 2010.

de vérité », pour faire partager notre curiosité et favoriser une démarche *active* et la plus *autonome* possible vers la connaissance.

Quelle fut l'idée fondatrice de notre approche ? Elle était fort simple : amener les enfants à se questionner sur un thème choisi, puis les accompagner dans une démarche réflexive et expérimentale pour tenter de trouver et d'élaborer des réponses... En raison de la valeur que nous accordons au questionnement et à la recherche de réponse *par soi-même*, nous sommes obligés à ne pas assener des réponses « toutes faites » et à laisser la

plupart du temps les enfants dans leurs interrogations, et parfois dans la frustration qui en découle !

À l'image du chercheur qui possède son fameux « cahier de manip » où il consigne soigneusement les paramètres de chaque expérience, chaque enfant a aussi un « cahier d'expériences » sur lequel il en dessine les schémas (fig. 1) et présente les conclusions tirées des mises en commun. Un travail écrit est fait régulièrement.

À partir du questionnement, les élèves proposent des expériences et nous les guidons dans cette démarche. Nous n'avions pour travailler que peu de matériel disponible. C'était surtout de la « débrouille » et de l'improvisation : récupération d'objets glanés ici ou là, achats de dernière minute au supermarché du coin...

Une séance se divisait donc en plusieurs temps :

- la mise en place du questionnement ;
- le travail expérimental, qui se faisait généralement par petits groupes de 2 à 4 élèves ;
- une mise en commun et une discussion avec toute la classe ;
- le passage à l'écrit, la schématisation de l'expérience et les conclusions issues de la mise en commun.

Ces conclusions étaient parfois reformulées par la maîtresse, qui précisait aussi le vocabulaire faisant défaut pour désigner un phénomène identifié par les élèves (la vaporisation, l'ébullition...).

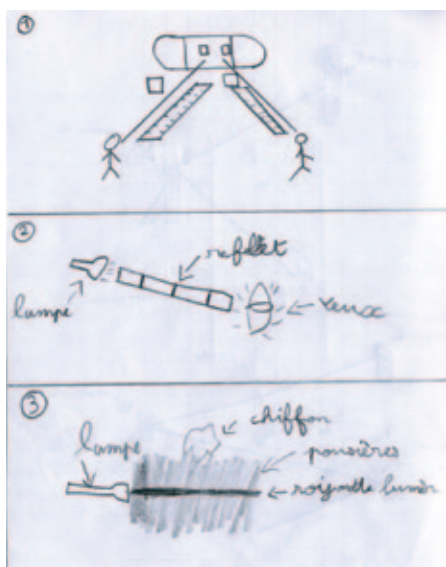
Les différents thèmes et la façon de les aborder

De nombreux thèmes ont été abordés dans les différents niveaux : les états de l'eau, « flotte et coule », la « peau de l'eau » (i.e. la tension de surface), l'air, la lumière, l'électricité, le son, l'énergie, le temps et l'espace, la gravitation...

La façon d'aborder un thème n'était pas unique, loin de là. Nous recherchions à chaque fois un angle d'approche nouveau, le but étant de susciter l'étonnement et un questionnement : un défi posé à la classe (Peut-on faire flotter un trombone ?), une réflexion autour d'une notion ou d'un concept, une expérience, ou encore un simple objet (un instrument de musique) en guise de point de départ.

Nous démarrions souvent par un défi : Comment faire flotter un bout de pâte à modeler (thème « flotte-coule ») ou encore un trombone sur l'eau (pour aborder la notion de tension de surface) ? Certains thèmes ont été introduits par une réflexion commune à bâtons rompus autour d'une notion : ce fut le cas pour *l'énergie* ou *le temps*. L'imaginaire était parfois sollicité dans le travail en guise de motivation de l'expérience ou d'application (réalisation d'un théâtre d'ombres pour le thème « ombre et lumière »).

Ainsi, pour la première séance en classe de CP, nous avons demandé à chaque enfant d'apporter de chez lui des glaçons.



1. Schéma extrait du cahier d'expériences d'un élève, lors d'une séance sur la lumière.



L'un d'eux est arrivé avec un sac plein d'eau et de surcroît troué, ce qui rendait la scène assez amusante ! D'autres s'étaient visiblement renseignés auprès de leurs parents et avaient apporté une véritable glacière !

« Pourquoi certains glaçons ont-ils fondu alors que d'autres sont restés presque intacts ? » avons-nous demandé à la classe. De là ont suivi de nombreuses expériences pour déterminer les facteurs intervenant dans ce phénomène surprenant !

La question suivante a été : « Comment faire pour faire fondre le glaçon plus ou moins vite ? » Les élèves ont alors suggéré d'enfermer le glaçon dans un pull, des sacs plastiques ou du papier aluminium (fig. 2), ou encore de le placer sous une lampe. Peu à peu, se dessinaient des interrogations autour de la notion de chaleur, qu'ils appréhendent en général plutôt à la manière d'un fluide !

Certaines années, nous avons même mis à profit les conditions climatiques en utilisant pour nos expériences la neige qui venait tout juste de tomber dans la cour de l'école ! Un autre jour, où brillait un grand soleil, nous sommes descendus dans la cour observer les ombres (thème « ombre et lumière »).

D'autres fois encore, nous sommes partis d'une observation : « Où va l'eau des flaques après la pluie ? D'où vient l'eau des rivières ? Que devient l'eau du linge quand il sèche ? » Nous avons ensuite fait plusieurs expériences sur l'évaporation de l'eau en plaçant une même quantité d'eau dans des récipients de formes diverses, fermés ou pas, dans différents lieux (sur le radiateur, à l'extérieur, dans le réfrigérateur). Nous avons ainsi cherché à comprendre ce qui influençait le phénomène.

Mais quelle que fut la méthode employée, l'essentiel pour cette partie introductive du thème était, après avoir suscité un questionnement, d'amener ensuite les enfants à envisager eux-mêmes les moyens expérimentaux pour tester leurs hypothèses et tirer des conclusions.

Deux exemples de séquences

À titre d'exemples, nous allons maintenant décrire le déroulement de deux séquences types sur les thèmes du son (abordé en CE1 sur 5-6 séances environ) et de la mesure du temps et de l'espace (abordé en CP-CE1).

Le son

Nous débutons la première séance en posant à la classe des questions autour du son : Qu'est-ce que le son ? Pourquoi entend-on « des trucs » ? Comment produit-on un son ?

Suite à une première phase de réflexion autour du thème conduisant à de multiples pistes (l'écho, sons entendus par le bébé dans le ventre de sa mère...), nous demandons d'identifier les différentes façons de le produire. Les élèves ont pour cela le choix de (presque !) tout le matériel disponible dans la classe.

Nous laissons tout d'abord les élèves chercher différentes façons de produire un son, ce qui se traduit par une séquence vraiment très sonore ! Puis, au terme d'une mise en commun, nous élaborons ensemble un tableau pour identifier ce qui produit le son : les battements du cœur, le vent dans les arbres ou encore la peau d'un tambour...

Pour la séance suivante, la maîtresse demande à chacun d'apporter un objet qui produit un son. Certains élèves viennent avec un instrument de musique, d'autres avec des objets beaucoup plus incongrus !

Après une nouvelle phase d'expérimentation quelque peu bruyante, la discussion sur la façon de produire un son reprend. Nous réfléchissons ensemble, en particulier sur le fonctionnement des différents instruments de musique : guitare, xylophone, flûte et tambour. Cela nous permet ensuite de classer les différents sons dans un tableau, en fonction de l'action associée pour le produire :

Frapper, cogner – Souffler – Frotter – Eau qui coule – Briser, casser.

À ce stade, plusieurs caractéristiques du son ont été proposées telles que : « Le son se déplace », « se disperse », « rebondit » (écho), ou encore que celui-ci a « quelque chose à voir avec l'air ».

Nous essayons alors de faire travailler les enfants différemment en explorant les possibilités sonores d'un même objet, ce que nous faisons en distribuant à chaque groupe des bouteilles vides en plastique. La consigne est très simple : trouver différentes façons de produire un son avec cet objet particulier. Ils s'en donnent à cœur joie, en tapant avec ou sur la bouteille, en soufflant dessus, en la remplissant d'eau ou en la frottant contre un autre objet.

Peu à peu, au fil de ces expériences un mécanisme est identifié et proposé par les

élèves : la notion de « vibration ». Cette idée est approfondie de manière expérimentale avec des lames de xylophone en induisant une vibration que l'on peut sentir avec les doigts, et que l'on peut atténuer par une légère pression.

Pour clore ce thème de façon pédagogique, deux élèves ont préparé un exposé sur le fonctionnement de l'appareil auditif et des cordes vocales...

Mesure du temps et de l'espace

Nous débutons la séquence par une petite réflexion thématique : Qu'est-ce que le temps ? Quels phénomènes se répètent ?

Après cette première discussion, nous demandons aux élèves de dessiner leur vision personnelle du temps. Il s'ensuit un nouvel échange collectif sur la base des travaux de quelques-uns, qui viennent présenter leur dessin à tour de rôle à la classe.

Puis nous les questionnons à propos de la notion de mesure, thème que nous souhaitons aborder maintenant : C'est quoi mesurer quelque chose ? Comment mesurer le temps ?

Afin d'entrer véritablement dans le vif du sujet et dans l'expérimentation, nous posons un défi aux enfants :

« Imaginons que nous sommes des spéléologues et que nous aimerions mesurer le temps... Comment procéder si, par malheur, nous avons oublié notre montre à l'extérieur ? »

Pour cela, on fournit le matériel suivant : de petites bouteilles en plastique, de la semoule... Les élèves s'attèlent alors à la fabrication d'un sablier. Nous passons ensuite un certain temps à comprendre ensemble ce qui ne fonctionne pas bien et à optimiser leurs réalisations.

À ce stade, nous proposons un nouveau défi : mesurer la durée d'une chanson ! En comparant les mesures des différents groupes d'élèves, on parvient à l'idée qu'il est nécessaire d'établir un étalon de mesure. Les élèves proposent d'eux-mêmes d'utiliser la durée d'une chanson très courte pour donner l'unité de temps. L'étalon de temps est appelé « le canard » !!!

Après ce travail sur le temps, nous souhaitons aborder la notion d'espace et la mesure d'une longueur. Nous commençons par débattre du sens du mot « espace », puis vient un exercice de représentation personnelle de cette notion. Ce petit travail nous conduit à une réflexion collective autour de la notion de « grand » et « petit »... Tout est relatif !



2. Schéma extrait du cahier d'expériences d'un élève, lors d'une séance sur les états de l'eau.

3. La classe en plein travail pendant un atelier.

Nous proposons ensuite un tout premier défi : Comment mesurer un objet sans règle ? Les idées fusent et les élèves utilisent les objets les plus saugrenus ! Le deuxième défi consiste à mesurer la longueur de la table sans règle... Pas si facile !

Comme pour la mesure du temps, les élèves parviennent naturellement à la conclusion qu'un étalon de mesure est nécessaire afin de pouvoir comparer les résultats des différentes mesures de chaque groupe.

Dans un deuxième temps, nous demandons aux élèves de représenter leur table sur une feuille A3, puis de comparer leur dessin avec leur table réelle. On en vient ainsi à la notion de « plan », dont nous expliquons l'utilité. La séquence se termine par un travail de groupe, qui consiste à représenter à l'échelle le plan de la classe sur une feuille A3.

Au terme de ce travail, il semble que les élèves aient bien compris les notions de mesure et d'étalon de mesure du temps ou de la longueur.

Vers une école plus humaine et plus créative ?

Celui « qui n'est plus capable de s'émerveiller et de s'étonner, est en quelque sorte mort, et son œil est éteint » disait Einstein [2]. Dans le sillage de cet illustre savant, la curiosité et son développement au sein de l'école nous semblent être le

cœur du processus éducatif. Or, l'éducation actuelle, malgré certaines évolutions ces quarante dernières années, est toujours principalement fondée sur une transmission passive du savoir, le développement de la créativité restant très peu présent.

Nous pensons que les ateliers science proposent une toute autre façon d'aborder la connaissance. Ils favorisent en effet l'ouverture sur le monde, la réflexion, l'imagination, l'esprit critique, le sens du collectif (notamment par le travail en groupe et les mises en commun). L'élève est actif : il réfléchit, invente, crée, regarde autour de lui, détourne les objets. Il se pose des questions et imagine par lui-même les moyens pour y répondre, dans une confrontation au réel et à l'autre qui se révèle toujours instructive.

D'autre part, la relation maître-élève est très différente de celle d'un cours magistral. Par le biais des échanges individuels avec les élèves et du travail en petits groupes (fig. 3) se tissent naturellement des liens entre élèves et avec les enseignants, et ceci nous paraît fondamental.

En effet, chaque enseignant a pu constater que nul ne peut apprendre s'il n'a pas la motivation nécessaire, autrement dit s'il n'est pas animé par l'envie de connaître et de comprendre. En d'autres termes, le désir d'apprendre, de découvrir doit avoir un certain sens pour l'élève. Ce désir s'acquiert avant tout dans le cercle familial, à travers les relations parents-enfants autour de la lecture et du savoir. Cependant, il

faut faire en sorte que l'école soit aussi un lieu où cette dimension puisse éclore et bourgeonner. Encore faut-il pour cela accepter que le côté « humain » ait pleinement sa place et ne soit pas négligé.

L'auteur autrichien Hugo von Hofmannsthal écrivait cette très belle phrase : « Toute rencontre me brise et me recompose. » Il en va de même pour chaque connaissance véritable que nous acquérons, qui nous conduit à reconstruire à chaque fois un édifice en intégrant cette nouvelle pierre. Cette intégration nous est rendue possible par l'exercice de notre faculté de penser. Mais encore faut-il apprendre à bien penser, et ce en relation étroite avec la réalité qui nous entoure. Cette rigueur, la démarche de la physique expérimentale l'exige en permanence, et elle devient un modèle transposable, non seulement dans de nombreux domaines du savoir, mais également dans la vie quotidienne.

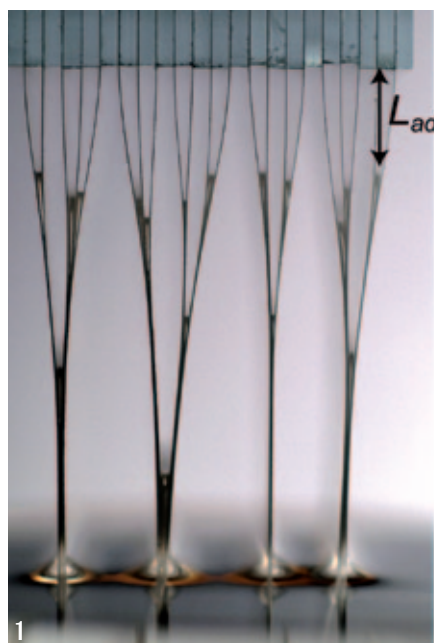
Les ateliers science menés à l'école élémentaire Boucicaut ne visaient pas tant la transmission d'un savoir scientifique que celle de la joie de découvrir et l'exercice exigeant de la pensée. ■

Références

- 1• A. Einstein, *Comment je vois le monde*, Éditions Flammarion (1999).
- 2• G. von Boehm, *Qui était Albert Einstein ?* Éditions Assouline (2005).

Poils mouillés : une expérience de recherche et de partage de savoirs... à hérissier les cheveux

Projet expérimental mis au point pour l'exposition interactive sur les forces et les formes dans la matière, « Ruptures », présentée au Palais de la découverte jusqu'au 10 novembre 2013 (voir annonce, p. 9).



1. Retrait d'une brosse modèle d'un bain de liquide mouillant (bain d'huile, en bas de l'image). La brosse est constituée de lamelles de film polymère de $50 \mu\text{m}$ d'épaisseur, séparées de 1 mm par des lames de microscope (qui apparaissent bleutées en haut de l'image). Les lamelles s'assemblent successivement en des mèches de plus en plus grosses, selon un processus de coalescence capillaire.

2. Détermination du volume de liquide optimal permettant le collage de deux fibres (le volume de liquide croît du haut vers le bas). Dans un premier temps, l'augmentation du volume de liquide accroît l'extension de la zone collée (a, b). Cependant, au-delà d'un volume optimal, le long pont capillaire se déstabilise en une goutte de petit diamètre et les fibres se décollent (c, d, e).

Trempons un vieux pinceau ébouriffé dans un verre d'eau. Une fois immergé, son état ne change guère. Retirons-le de son bain, il reprend une belle forme effilée. De la même manière, une fois mouillée, une chevelure en brosse s'associe en mèches. Cette expérience banale est importante pour des applications qui mettent en jeu des fibres (cosmétiques, matériaux composites). Elle est également cruciale lors de la mise au point de microsystèmes électromécaniques (MEMS), car une des étapes de leur élaboration implique souvent le retrait d'un bain de solvant. Les micro-ailettes d'un accéléromètre destiné à déclencher un *airbag* peuvent ainsi se retrouver dramatiquement collées entre elles.

Combien de cheveux se retrouvent associés dans une mèche humide ? Et quelle quantité d'eau optimise cette adhésion ? La réponse à ces questions résulte d'un équilibre entre les forces capillaires dues au liquide emprisonné et la rigidité du cheveu qui s'oppose à sa déformation. Des expériences macroscopiques sur des brosses modèles ont permis à deux groupes, à Paris (PMMH-ESPCI, LPS-ENS) et à Princeton (Dep. of Mech. and Aero. Eng.), d'élucider respectivement ces deux points. L'association en mèches résulte d'une succession de collages de paires de mèches de taille de plus en plus importante (fig. 1). L'étude d'une étape

élémentaire de cette coalescence (brosse à deux poils) montre que la distance de collage L_{adh} de deux mèches par rapport à leur racine suit une loi géométrique simple :

$L_{adh} \sim (d L_{ec})^{1/2}$, où d est la distance qui sépare les deux mèches et L_{ec} est une *longueur élastocapillaire* qui compare capillarité et rigidité de la structure [1].

Une fibre possède cependant une autre échelle caractéristique : son rayon. Camille Duprat et ses collaborateurs ont ainsi montré que cet ingrédient supplémentaire dicte le volume optimal permettant le collage de deux fibres (fig. 2) [2].

Les différents auteurs de ces travaux, C. Duprat, B. Roman, J. Bico, A. Boudaoud (qui sont loin d'être des poules mouillées !), sont associés à l'exposition « **Ruptures : les matériaux roulent des mécaniques** » au Palais de la découverte, qui propose une cinquantaine d'expériences originales provenant d'une douzaine de laboratoires, et initialement mises en place par Centre Sciences (à Orléans, sous le titre « Toucher, casser, couler »). ■

José Bico (jbico@pmmh.espci.fr)

PMMH, ESPCI, 10 rue Vauquelin, 75231 Paris Cedex 05

Références

- 1• J. Bico, B. Roman, L. Moulin et A. Boudaoud, "Elastocapillary coalescence in wet hair", *Nature*, **432** (2004) 690.
- 2• C. Duprat, S. Protière, A.Y. Beebe et H. A. Stone, "Wetting of flexible fiber arrays", *Nature*, **482** (2012) 510.

Conseil d'administration, 30 novembre 2012

Le conseil, après examen des propositions des jurys, a décerné les prix suivants :

- **Prix Gentner-Kastler 2013** : Peter Wölfle (Physique théorique, Université de Karlsruhe).
- **Prix Louis Ancel 2012** : Odile Stephan (Physique des solides, Orsay).
- **Prix Jean Perrin 2012** : Denis Savoie (Palais de la découverte).
- **Prix Joliot-Curie 2012** : Thomas Duguet (Physique nucléaire, CEA Saclay).

Le CA a, par ailleurs, ratifié les nominations de trois nouveaux responsables :

- **Section locale Auvergne** : Vincent Morenas (morenas@clermont.in2p3.fr).
- **Division de physique nucléaire** : Jérôme Margueron (jmargue@ipno.in2p3.fr).
- **Division Champs et Particules** : Sandrine Émery-Schrenk (sandrine.emery@cea.fr).

C.H. de Novion fait le point sur le rapprochement de *Reflète de la physique* avec la revue annuelle du CNRS, les *Images de la Physique*. Lors d'une réunion SFP-INP qui s'est tenue le 6 novembre, les décisions suivantes ont été prises :

- 1 - La future revue commune sera « légalement » SFP et conservera la périodicité de *Reflète* (5 numéros par an).
- 2 - Le numéro 32 de *Reflète* (janvier 2013), intégrant deux articles des *Images* 2012, sera distribué gratuitement aux destinataires des *Images*.
- 3 - Poursuite sur 4 numéros, en 2013, de la formule du n°32 ; le CNRS participera au financement de la revue.
- 4 - À partir de juillet 2013, un tarif dégressif d'abonnement sera mis en place pour les personnes non membres de la SFP (voir l'éditorial de *Reflète* n°32 et le message de la rédaction, p. 47).
- 5 - Une campagne d'adhésion à la SFP accompagnera la publication de la « revue élargie ».

Le CA donne son accord pour les points 3 et 4. Il demande à ce que lui soit soumise la nouvelle formule qui sera proposée pour 2014.

Le séminaire SFP d'Orléans 30 novembre et 1^{er} décembre 2012, Novotel Orléans La Source

Le séminaire a débuté par une table ronde animée par Rémy Mosseri, sur les Assises de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

Un exposé de Jean-Louis Bobin sur l'énergie a été très apprécié. Celui de Bart van Tiggelen a permis de manifester le soutien de la SFP au texte proposé par la commission « publications », mettant en garde les instances d'évaluation sur les dangers d'une prise en compte trop exclusive des facteurs d'impact des revues (voir *Reflète* n°32, p. 46). Jean-François Joanny et Dave Lollmann, respectivement présidents du comité scientifique et du comité d'organisation, ont présenté l'état des lieux de la préparation du congrès général de 2013 à Marseille (voir l'annonce en 4^e de couverture).

Suivant le souhait de la majorité des présents, les bilans habituels par section, division et commission, ont été remplacés par une discussion générale sur le fonctionnement de la SFP, qui a surtout porté sur l'organisation des congrès. L'idée d'un document « Faits marquants SFP 2012 », réalisé à partir des rapports d'activités, a été émise.

L'assemblée générale du 1^{er} février 2013

Elle s'est tenue à l'amphithéâtre Paul Painlevé du CNAM, 292 rue Saint-Martin, Paris, 3^e.

En début de séance, la trésorière, Françoise Bourée, a présenté les comptes de la SFP pour l'exercice 2012. Le compte de résultats présente une marge nette positive, mais en baisse par rapport à l'année précédente, en partie par suite de l'absence circonstancielle de dividendes d'*Europhysics Letters*.

Le résultat des élections au Conseil d'administration et la composition du nouveau Bureau ont été annoncés par le secrétaire général sortant, Mohamed Daoud. Notons trois nouvelles entrées au Bureau : Alain Fontaine, vice-président entrant ; Gérard Bonneaud, nouveau secrétaire général ; Marc Stehle, chargé des relations industrielles, qui remplace Vincent Mosser.

Dans son allocution, le président de la SFP, Michel Lannoo, remercie le *Past-President*, Martial Ducloy, pour l'activité qu'il a déployée, particulièrement en matière de relations internationales, ainsi que Mohamed Daoud. Il fait un bilan des actions déployées en 2012 (voir l'éditorial de *Reflète* n°30) et il annonce qu'en 2013 la priorité sera donnée à la refonte du site *web*, avec l'aide de professionnels.

L'assemblée générale a été suivie par une journée scientifique ouverte au public, *Regards de physicien(ne)s*, organisée par la section Paris-Centre. Le programme et les documents de présentation des conférences sont accessibles sur : sfp-paris.fr/news/2012/11/15/regards-de-physiciennes-2013/.



© Coyau / Wikipedia Commons

► Résultat des élections

Votants : 435

Sont élus pour 3 ans :

- Robert-Philip Isabelle (352 voix)
- Lèbre Agnès (334 voix)
- Émery-Schrenk Sandrine (328 voix)
- Coupré Marie-Emmanuelle (323 voix)
- Levelut Claire (323 voix)
- Dulieu Olivier (280 voix)
- Anakkar Abdelkader (262 voix)
- Merlen Alexandre (262 voix)
- Brémond Georges (259 voix)

La composition du nouveau Conseil d'administration et du nouveau Bureau sera donnée dans un prochain numéro de *Reflète de la physique*.

MESURExpoVISION 2012

La SFP partenaire de GL events Exhibitions

23, 24 et 25 octobre 2012, Paris expo Porte de Versailles, Pavillon 1

MESURExpoVISION 2012 est l'un des quatre salons regroupés sous la bannière enovaPARIS 2012 de GL events Exhibitions ; les trois autres sont Opto, Carrefour de l'électronique et RF&Hyper. Les trois journées de conférences et les deux remises de prix, organisées par la Société Française de Physique au sein de MESURExpoVISION, ont connu un beau succès.

En cette année difficile pour l'économie, GL events qui recherchait la convergence des technologies et la synergie des quatre salons, semble avoir atteint son but puisqu'il clôture par la réussite de l'édition 2012 : 412 sociétés exposantes pour 5563 visiteurs (+ 9% par rapport à 2011) et 1270 participants aux conférences. MESURExpoVISION a accueilli 163 exposants. L'analyse des principaux secteurs d'activité sur l'ensemble des quatre salons donne : électronique industrielle 16%, mesure et instrumentation 8%, recherche, laboratoires et organismes de recherche 8%, aérospatial et aéronautique 7%, automobile et autres transports 5%, éducation et formation 5%, services, conseil et bureaux d'études 5%.

L'innovation, véritable levier de croissance, a été au cœur des salons avec les remises du Prix Yves Rocard de la SFP et du Prix d'Instrumentation de la Division de Chimie Physique de la SCF et de la SFP au salon MESURExpoVISION, les palmarès des Trophées de l'innovation, des trophées Cap'tronic, la Vitrine de l'innovation et ses Photons organisés par le périodique *Photoniques* avec l'AFOP et la Société Française d'Optique.

Les Journées de conférences

Nanosciences pour l'énergie

Journée organisée le mardi 23 octobre 2012 par le Centre de Compétences Nanosciences (C'Nano France et C'Nano Île-de-France), la Société Chimique de France (SCF) et la Société Française de Physique (SFP).

Les énergies de stock, combustibles chimiques ou nucléaires, ont des réserves limitées. Les énergies renouvelables sont inépuisables, mais elles souffrent d'intermittences aléatoires. Toutes nécessitent d'importants efforts de recherche fondamentale et appliquée dans des domaines variés. Dans celui des nanosciences, de nombreux laboratoires cherchent à modifier les propriétés des matériaux (conduction électrique, propriétés magnétiques...) par la diminution de la taille des particules et des distances de parcours en leur sein ou par l'augmentation de la surface interfaciale. Les dernières avancées des nanosciences pour l'énergie ont été présentées. Les attentes et les espoirs ont été discutés au cours d'une table ronde animée par Sylvie Rousset, directrice de C'Nano Île-de-France. Les fichiers PDF des conférences invitées sont sur la page web <http://sfp.in2p3.fr/expo/>



La table ronde sur les nanosciences pour l'énergie. De gauche à droite : Sylvie Rousset, Thierry Priem (CEA/DRT), Fabrice Stassin (Umicore) et Jean-Louis Bobin (Université Paris 6 et SFP).

Sciences du climat et de l'environnement

Organisée le mercredi 24 octobre 2012 par la Division de Chimie Physique (DCP) commune à la SCF et à la SFP, cette journée a montré à quel point les connaissances en physique et chimie sont utiles à la compréhension et à la modélisation des phénomènes se produisant dans notre atmosphère et notre géosphère. La DCP remercie les orateurs de cette journée : Gilles Ramstein, Jean Poitou, Valérie Masson-Delmotte, Wahid Mellouki, Paolo Laj, Matthias Beekmann et Alain Manceau.

Contrôle non destructif et caractérisation de défauts

Journée organisée le jeudi 25 octobre 2012 par l'Université de Reims Champagne-Ardenne, la SFP et la Société Française de Thermique.

Cette journée était préparée par Jean-Luc Bodnar (Université de Reims Champagne-Ardenne et SFP). Les orateurs ont brossé un vaste panorama des méthodes : thermographie infrarouge, simulation et imagerie, imagerie ultrasonore, applications industrielles, tomographie et radiographie X, magnétoscopie, ressuage et courants de Foucault, méthodes ultrasoniques et thermo-optiques, accélérateurs à plasma laser.

Les fichiers PDF des conférences invitées sont sur la page web <http://sfp.in2p3.fr/expo/>

Le stand de la SFP

Sur le stand de la SFP, animé par Véronique Lemaitre, les visiteurs ont assisté aux démonstrations sur le stockage de l'hydrogène de Patricia de Rango et Salvatore Miraglia (Institut Néel CNRS-UJF, Grenoble), venus recevoir le Prix Yves Rocard. Des représentants de l'Institut d'Électronique Fondamentale/Université de Paris Sud XI Orsay et C'Nano Île-de-France présentaient des expériences pour illustrer les nanosciences et les nanotechnologies. ■

J.-C. Mialocq, Président du Comité d'Exposition de la SFP
V. Lemaitre (sfp@sfpnet.org), Agent général de la SFP

Prix Yves Rocard 2012 de la SFP



© J.C. Maloq.

1



© J.C. Maloq.

2

Le prix Yves Rocard a été remis le mardi 23 octobre 2012, lors du salon Mesurexpovision, par Michel Lannoo, président de la SFP, en présence de Pascal Fouillat, directeur scientifique au ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, et d'Yves Farge, président du jury. Les lauréats, Patricia de Rango (1), Salvatore Miraglia (2), Daniel Fruchart (Institut Néel, CNRS-UJF, Grenoble), Philippe Marty (LEGI, UJF-CNRS, Grenoble) et Michel Jehan (McPhy Energy, La Motte-Fanjas), sont récompensés pour leur développement innovant du « Stockage de l'hydrogène dans le magnésium : une solution pour la gestion de la production intermittente de l'énergie ».

Le développement des énergies renouvelables intermittentes nécessite d'imaginer de nouvelles solutions de stockage de l'énergie. Le stockage par absorption sur hydrures métalliques (en particulier de magnésium) est une solution très intéressante, à condition de développer des matériaux performants.

L'Institut Néel a mis au point une technique sophistiquée (cobroyage d'hydrure de magnésium avec de faibles concentrations de métaux de transition) permettant d'obtenir des poudres nanostructurées très réactives, puis (par compression avec du graphite expansé) un matériau composite qui présente des cinétiques d'absorption ou de désorption

de l'hydrogène élevées, compatibles avec les applications visées. D'autre part, le développement de réservoirs de grande taille (fig. 1) a nécessité de trouver des géométries innovantes pour résoudre le problème de leur gestion thermique, du fait des flux très importants de chaleur générés par la réaction chimique d'absorption qui permet le stockage de l'hydrogène.

Ce travail a donné lieu à plusieurs brevets. Le droit de licence a été acheté par la société McPhy Energy, créée en 2008, qui développe des solutions industrielles de production d'hydrures réversibles et de conceptions de réservoirs.



1. Réservoir d'hydrure de magnésium d'une capacité de 7m³ d'hydrogène.

Prix d'instrumentation en chimie-physique 2012 de la SCF et de la SFP

Le 24 octobre, au salon Mesurexpovision, le Prix d'instrumentation 2012 de la Division de Chimie Physique, commune à la Société Chimique de France (SCF) et à la Société Française de Physique (SFP), a été décerné à Jérôme Polesel (CEA Saclay, DSM/IRAMIS). Le lauréat est récompensé pour sa réalisation d'une « Nouvelle approche pour scruter la protéine : nanosonde de force à capteur intégré piézoélectrique ».



© J.C. Maloq.

De gauche à droite : François Piuze (DCP), Emmanuel Maisonhaute (DCP), le lauréat Jérôme Polesel et Stanislas Pommeret (président de la DCP).

Avec sa capacité à observer, manipuler et explorer les composants fonctionnels de la cellule avec une résolution nanométrique, le microscope à force atomique (AFM) a révolutionné les recherches en nanobiotechnologies, pour devenir un instrument incontournable, en offrant de nouvelles opportunités d'analyse ultrafine pour la nanomédecine et le diagnostic personnalisé. Néanmoins, les systèmes AFM actuels utilisent un système de détection de déflexion du microlevier par laser, difficilement intégrable

sur un microscope optique, ou bien source d'artefacts de mesures à cause de la présence du laser. Ce laser peut aussi devenir un obstacle pour l'étude de systèmes biologiques photosensibles. Enfin, cette détection optique est inenvisageable en solution turbide.

Les travaux de Jérôme Polesel apportent une approche originale pour lever ces verrous, en proposant l'utilisation inédite d'une sonde à capteur intégré piézoélectrique en milieu biologique. Le lauréat a, en outre, développé une nouvelle méthodologie de

fonctionnalisation, conférant des propriétés d'accrochage biochimique spécifique entre l'extrémité de la pointe de cette sonde AFM et des matériaux biologiques. Il a montré que ce type de sonde permet d'atteindre une sensibilité en force de l'ordre de la centaine de piconewtons, et une caractérisation à l'échelle d'une seule protéine.

Ce prix était parrainé par les sociétés Amplitude Systèmes, Horiba Scientific, PI (Piezo Nano Positioning) et Quantel.



Prix Jean Ricard 2012 : Sébastien Balibar

Sébastien Balibar, né en 1947, est directeur de recherche de classe exceptionnelle au CNRS, membre du Laboratoire de physique statistique de l'École normale supérieure (ENS) à Paris. Ancien élève de l'École polytechnique, il a soutenu sa thèse de doctorat d'État en 1976, sous la direction d'Albert Libchaber. Il a récemment été élu membre de l'Académie des sciences.

Physicien expérimentateur, Sébastien Balibar a principalement étudié les propriétés des liquides et des solides quantiques. Sa grande originalité réside dans le fait que ses expériences sont toujours en relation étroite avec des questions très fondamentales de physique statistique, telles que l'évaporation des liquides quantiques, la structure des surfaces cristallines et la croissance des cristaux, ou la cavitation (c'est-à-dire l'apparition de bulles) dans un liquide en dépression.

Ses recherches actuelles portent sur l'énigme de la supersolidité, c'est-à-dire la plasticité géante des cristaux quantiques (voir son article dans *Reflets de la physique*

n°16 (2009), pp. 12-16), un problème où l'hélium prouve une fois de plus sa qualité de modèle en science des matériaux.

Il s'est aussi intéressé à l'acoustique musicale, à l'histoire des sciences et aux questions d'énergie et d'environnement.

Sébastien Balibar est reconnu comme un physicien exceptionnel sur le plan international : il a reçu en 2005 le prix London, plus haute distinction en physique des basses températures, pour ses travaux fondamentaux sur la croissance et la forme des cristaux d'hélium. Il a été professeur invité à Konstanz, Kyoto et Harvard.

Parallèlement à son activité de chercheur, il s'est depuis longtemps investi dans l'in-

formation scientifique. Il a écrit un grand nombre de contributions pour *La Recherche*, deux livres de vulgarisation très bien reçus (*La pomme et l'atome*, chez Odile Jacob, et *Je casse de l'eau et autres rêveries scientifiques* aux éditions du Pommier) ; il est co-auteur de *Demain, la physique* (Odile Jacob, 2004). Il participe régulièrement à des émissions de télévision.

Sébastien Balibar, qui allie une haute technicité expérimentale à une grande profondeur dans sa compréhension des phénomènes physiques qu'il étudie, est un lauréat idéal du grand prix Jean Ricard de la Société Française de Physique.



Prix Félix Robin 2012 : Jean-Pierre Lasota

Né en 1942, Jean-Pierre Lasota a soutenu sa thèse de doctorat en 1971 à l'Institut de physique théorique de l'Université de Varsovie. Recruté en 1983 par le CNRS, il est actuellement directeur de recherche émérite à l'Institut d'astrophysique de Paris (IAP) et professeur à l'observatoire astronomique de l'Université Jagellon de Cracovie (Pologne).

Son principal domaine de recherche concerne l'astrophysique des hautes énergies et les objets astrophysiques dits compacts : naines blanches, étoiles à neutrons, trous noirs. La description de ces objets, et des phénomènes hautement énergétiques qui les caractérisent, nécessite la compréhension d'une physique complexe, s'appuyant sur des développements mathématiques ou numériques sophistiqués, couvrant un domaine allant de la physique des hautes énergies à la relativité générale.

Au cours de sa brillante carrière, Jean-Pierre Lasota a apporté des contributions déterminantes à notre connaissance de ces objets compacts, permettant d'élucider en partie

leurs mécanismes de formation et leur évolution. Lasota a plus particulièrement permis de comprendre le rôle essentiel de l'accrétion de matière sur ces objets, générant les phénomènes les plus violents dans l'Univers. Son nom est attaché à des découvertes majeures, comme l'effet « Abramowicz-Lasota » en relativité générale. Lasota a également été un pionnier dans le domaine des systèmes binaires, composés d'une étoile naine blanche (ou d'une étoile à neutrons) et d'un compagnon stellaire.

Jean-Pierre Lasota est un des acteurs majeurs ayant permis l'essor de ce qu'il est convenu d'appeler désormais le domaine des *astroparticules*, à la frontière entre

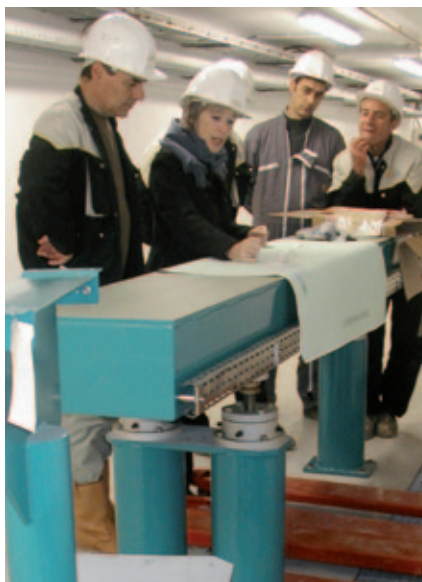
astrophysique, physique nucléaire et physique des hautes énergies. Il a également joué un rôle moteur dans le développement des projets de détecteurs d'ondes gravitationnelles, tels que VIRGO. Ses recherches ont toujours été fondées sur la compréhension de théories *physiques*, et ses travaux ont contribué sans conteste au rayonnement de l'astrophysique et de la physique française.

Il a écrit un livre de vulgarisation, *La science des trous noirs*, publié chez Odile Jacob.

Le jury des grands prix de la SFP a considéré que Jean-Pierre Lasota mérite amplement le Prix Félix Robin pour l'ensemble de sa carrière.

Marie-Agnès Tordeux : accélératrice de particules

Ingénieure de recherche au CNRS, Marie-Agnès Tordeux est spécialiste des accélérateurs de particules et l'une des conceptrices du synchrotron SOLEIL, l'un des 40 grands équipements scientifiques français, source de lumière parmi les plus intenses au monde, destinée à étudier la géométrie et les propriétés de la matière. Un instrument qu'elle bichonne depuis plus de dix ans avec un plaisir sans faille.



Marie-Agnès Tordeux (2^e à partir de la gauche) et l'équipe des mécaniciens du synchrotron, au printemps 2005, lors de l'installation des premières poutres supports de la machine dans le tunnel du LINAC, injecteur de SOLEIL.

Derrière une paire de lunettes à fine monture rose, le regard ne manque pas de malice. Néanmoins, Marie-Agnès Tordeux hésite à parler d'elle, s'en sort en commençant par faire l'éloge de ses collègues. Pour autant, pas la moindre trace de coquetterie chez cette ingénieure, l'un des cinq membres du groupe de physique des accélérateurs du synchrotron SOLEIL : « Mon plus grand plaisir est d'avoir vu se construire cette machine et, dix ans plus tard, de continuer à travailler avec les mêmes personnes au quotidien », confie-t-elle.

De fait, c'est elle qui en a conçu l'accélérateur linéaire (LINAC) et les lignes de transfert, éléments de l'injecteur de l'anneau de stockage. La fabrication et l'installation des premiers éléments de la machine dans les lignes de transfert se sont faits sous sa responsabilité. Après avoir assuré en 2005 la mise en service du LINAC en collaboration avec son fabricant THALES, elle a participé à la mise en place du premier faisceau stocké, « un moment de concentration exceptionnel, où chacun est prêt à se remettre en cause... ».

À dire vrai, en 1997, lorsque SOLEIL est entré dans sa phase de conception, rien d'étonnant à ce que Marie-Agnès Tordeux fasse partie de l'aventure : elle avait fait ses armes, dès 1989, auprès de l'accélérateur linéaire de l'université d'Orsay. De cette période, la scientifique ne garde d'ailleurs pas un souvenir impérisable : « J'y ai fait mon apprentissage de façon trop isolée. De plus, le contexte très masculin et traditionnel de l'époque n'a pas été toujours facile à vivre », confie-t-elle.

Pour autant, la magie prend avec les accélérateurs, bien que Marie-Agnès Tordeux y soit presque venue par hasard. Lycéenne, elle se voit aux Beaux-Arts. Ce sera finalement une prépa scientifique, puis Centrale-Lyon, avant d'intégrer sans conviction l'industrie. « Je suis alors tombée sur une annonce de recrutement du Laboratoire pour l'Utilisation du Rayonnement Électromagnétique (LURE). Impulsions nanoseconde, accélérateur de 300 mètres...

La beauté de ces nombres hors du commun et cette physique qui me semblait alors déconnectée de la réalité m'ont décidée. Je quittais volontiers les préoccupations de rentabilité immédiate du monde industriel. »

C'est néanmoins cette physique, consacrée à une optimisation sans cesse renouvelée des performances de la machine, qui est devenue pour M.-A. Tordeux une réalité quotidienne. Ainsi, depuis 2010, elle est responsable de la mise au point d'un nouveau mode de fonctionnement du synchrotron, permettant de raccourcir les impulsions lumineuses délivrées aux scientifiques. « Ce projet a pris ses sources au LURE, sur une idée originale proposée par l'équipe machine ; elle a ensuite été développée sur l'anneau de SOLEIL, et la division Accélérateurs a été en mesure de proposer un nouveau mode aux scientifiques. J'aime cette interaction, qui enrichit ma compréhension de la science. »

Au sein du groupe, chacun est susceptible d'avoir un projet de recherche propre. M.-A. Tordeux s'intéresse depuis le début aux diagnostics du faisceau ; elle planche aujourd'hui sur une nouvelle méthode permettant de mesurer la durée d'impulsions ultracourtes, dans la gamme des femtosecondes. Une activité parfois frustrante lorsque les impératifs de fonctionnement ou les projets collectifs prennent le dessus.

Une aventure tout entière déployée entre les murs de SOLEIL, et dont la dimension humaine est manifeste : « SOLEIL nous offre l'opportunité extraordinaire de pouvoir tester directement nos simulations sur la machine. C'est exigeant, ne serait-ce que par le rythme en horaire décalé, et parce que la réponse du faisceau est sans appel... mais très excitant, même sept ans après la mise en route. Cela a aussi développé une longue relation de confiance dans le groupe et au-delà, qui est très importante pour moi : les échanges sont une partie essentielle de mon travail. » ■

Article écrit en collaboration avec **Mathieu Grousseau**, journaliste

Quelle physique pour le 21^e siècle ?

La couverture du numéro de juin 2012 (n° 466) du magazine *La Recherche*, « Spécial physique du 21^e siècle », décline les domaines dans lesquels de grandes découvertes sont attendues pour ce siècle^(*). Le contenu de ce numéro développe ces thèmes et, mis à part un article sur le monde quantique à notre échelle, ne laisse guère de place aux contributions d'une majorité de physiciens actuels. Si ces grands problèmes de la « physique des deux infinis » attendent nécessairement des solutions, se limiter à leur présentation offre une version tronquée de la physique. Pour prendre connaissance des développements actuels de notre discipline, il est sans doute plus réaliste de se reporter à l'ouvrage *Demain la Physique*, publié (chez Odile Jacob) à l'occasion de l'Année mondiale 2005, où les thèmes mis en avant dans *La Recherche* occupent moins du tiers de l'ouvrage, sans pour autant prendre en compte d'autres progrès spectaculaires récents.

Si l'on pense au siècle précédent, on peut constater combien de grandes découvertes se sont faites sans avoir été prévues. Ces ruptures ou, si l'on préfère, les « révolutions scientifiques » décrites par Kuhn, qui accompagnent de nouveaux paradigmes, ne s'anticipent pas. Elles s'appuient sur des avancées technologiques, en relation directe avec des domaines de recherche de base absents de la présentation tronquée de *La Recherche*.

Il est vrai que ces prédictions relèvent de la boule de cristal (comme le disait un grand physicien français responsable d'un de ces nombreux rapports de prospective). Nombre de grandes découvertes de la science du 20^e siècle, comme le laser et tous ses développements fondamentaux et appliqués, n'auraient pas fait la couverture d'un périodique de 1900, voire même du congrès international de physique quantique qui s'était tenu à l'École normale en 1960. Les nanomatériaux, qu'anticipait une déclaration du visionnaire Richard Feynman, et que concrétisera le microscope à effet tunnel inventé dans un grand laboratoire industriel, ont aussi fait une entrée en force dans tous les domaines scientifiques. On pourrait continuer ainsi, pour la plupart des grands développements de la science physique et de la Science en général. Si l'on veut en rester au niveau de grands problèmes généraux à résoudre, on pourrait citer la turbulence, le désordre, l'information quantique, les systèmes fortement corrélés, le retournement temporel...

La physique est aussi présente dans l'investigation du monde du vivant, dans un dialogue très fort où les expérimentations touchent directement le domaine de la santé. Les technologies actuelles dépendent de la compréhension des interactions physiques à des échelles variées, qui révolutionne la science des matériaux et la mécanique. La physique et la chimie sont aussi complices dans la découverte, l'élaboration et la création de nouvelles structures utiles à tous les domaines de la science. Ne faudrait-il pas mettre en avant le métier et les pratiques de l'*ingénieur physicien* qui arrive, avec ses expériences à des échelles variées, ses modèles, ses théories, à éclairer un peu plus le monde qui nous entoure et les développements qu'on peut en attendre pour la société ? C'est bien de *sciences physiques* qu'il conviendrait aujourd'hui de parler.

Souhaite-t-on freiner ou neutraliser la désaffection qui se manifeste pour notre discipline, où l'on voit des universités où disparaissent des départements de physique ? Ne conviendrait-il pas, au contraire, de montrer les multiples facettes de cette discipline, son regard introspectif, les outils créés au côté des inventions conceptuelles souvent imprévisibles ?

Étienne Guyon (guyon@pmmh.espci.fr)

Physique et mécanique des milieux hétérogènes, ESPCI, Paris

(*) Matière noire, boson de Higgs, neutrinos, théorie des cordes, supersymétrie, constante cosmologique, énergie sombre, particules (élémentaires), gravitation quantique, expansion de l'Univers, énergie du vide, ondes gravitationnelles, trous noirs.

Nous pensons que l'un des rôles de la Société Française de Physique est de veiller à ce que l'équilibre entre les diverses composantes de notre discipline soit respecté, en particulier dans les médias. N'oublions pas l'importance de la physique de la matière condensée, le fait que les États-Unis considèrent les nanotechnologies comme l'un des moteurs économiques du 21^e siècle, les progrès dans le domaine de l'optique, les innovations nombreuses résultant des interactions entre la physique et d'autres disciplines, etc. De tels oublis, fréquents dans nos médias, conduisent au fait que les industriels français embauchent moins de physiciens que dans d'autres pays développés.

Michel Lannoo

Président de la Société Française de Physique

Index des articles publiés dans *Reflets de la physique* en 2012 (n°28 à n°31)

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

Éditoriaux

- ▶ Allocution du président entrant Lannoo M., **28**, p. 2.
- ▶ Lettre aux candidats à l'élection présidentielle Lannoo M., **29**, p. 2.
- ▶ Société Française de Physique : évolutions récentes Lannoo M., **30**, p. 2.
- ▶ Les Assises de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Lannoo M., Belakhovsky M., **31**, p. 2.

Sciences

- ▶ Les vortex dans les supraconducteurs : une matière molle au sein de la matière dure van der Beek K., Levy-Bertrand F., **28**, p. 4.
- ▶ Le football et ses trajectoires Dupeux G., Cohen C., Le Goff A., Quéré D., Clanet C., **28**, p. 10.
- ▶ Derniers résultats sur la recherche du boson de Higgs au LHC di Ciaccio L., Hamel de Monchenault G., **28**, p. 15.
- ▶ Les atomes froids et la supraconductivité Chevy F., Castin Y., **29**, p. 4.
- ▶ Des atomes ultrafroids sous le microscope Lahaye T., Kuhr S., **29**, p. 9.
- ▶ Les quasicristaux : une recherche pluridisciplinaire exemplaire Gratias D., **29**, p. 12.
- ▶ Un an après le tremblement de terre, la physique des particules reprend de plus belle au Japon (Brève), **29**, p. 17.
- ▶ La planète Mars : un autre destin Encrenaz T., **30**, p. 4.
- ▶ Cordes et théories d'unification : l'éther du 20^e siècle ? Pétropoulos P.M., **30**, p. 12.
- ▶ Oxydes de cuivre supraconducteurs : un record et toujours un mystère Bourges P., Sidis Y., **31**, p. 4.
- ▶ Les supraconducteurs à base de fer Bourges P., Sidis Y., **31**, p. 10.
- ▶ Des problèmes inverses en physique Jobert G., **31**, p. 12.
- ▶ Découverte du boson de Higgs au LHC ? di Ciaccio L., Hamel de Monchenault G., **31**, p. 17.
- ▶ Quelques faits saillants de la conférence Neutrino 2012 Vannucci F., **31**, p. 20.
- ▶ Un pendule de Foucault fluide Boisson J., Cébron D., Moisy F., Cortet P.P., **31**, p. 22.

Histoire des sciences et biographies

- ▶ François-Marie Raoult et la loi de Raoult Williams R., **29**, p. 22.

Politique et organisation de la recherche

- ▶ Pour une réforme en profondeur de l'Agence Nationale de la Recherche Leduc M., Giacobino É., **29**, p. 32.

Enseignement

- ▶ Les classes préparatoires scientifiques aux grandes écoles : quelle place dans l'enseignement supérieur ? Jauffroy B., Remy S., **28**, p. 20.
- ▶ CETSIS 2011 : un lieu d'échange privilégié pour les enseignants dans le domaine des sciences de l'ingénieur Le Padellec A., **28**, p. 23.
- ▶ La réforme de la formation des enseignants, un an après... Billy N., Bodnar J.L., Dumora D., Le Padellec A., Villain L., **29**, p. 19.
- ▶ Olympiades internationales de Physique 2011 Chevalier-Théry S., **29**, p. 31.
- ▶ XIX^e concours national des Olympiades de Physique France Le Comité national des OdPF, **30**, p. 27.
- ▶ Les Olympiades internationales de Physique 2012 en Estonie Sciences à l'école, **31**, p. 30.

Culture scientifique

- ▶ Cap Sciences : un pont entre culture et économie Guyon É., **28**, p. 24.
- ▶ Culture scientifique et humanisme (XIX^e – XX^e siècles) – Histoire de la place accordée aux sciences dans les études secondaires Hulin N., **30**, p. 18.
- ▶ Une journée « Science et Médias » au Palais de la découverte Commission « Culture scientifique » de la Société Française de Physique, **31**, p. 26.

Édition scientifique, publications

- ▶ Réflexions sur la « Voie dorée » des publications scientifiques Henri A., van Tiggelen B., Leriche M.A., **30**, p. 28.

Science et société

- ▶ L'énergie en France et dans le monde. Quels choix politiques ? Bobin J.L., **29**, p. 34.

Expositions

- ▶ MESURExpoVISION 2011 : la SFP partenaire de GL events Exhibitions Mialocq J.C., Lemaître V., **28**, p. 29.
- ▶ Une exposition et un musée en Limousin dédiés à Louis-Joseph Gay-Lussac Métrot M., **29**, p. 24.

Femmes et sciences

- ▶ Le prix Jeanne Villepreux-Power : un prix régional pour des jeunes filles scientifiques du Limousin Doneda M., **31**, p. 25.

Coopération internationale

- ▶ Formations expérimentales pour les universités du Sud Gouet M., Guyon É., **30**, p. 22.

Vie de la SFP

- ▶ Le Congrès général de Bordeaux 2011 Villain-Guillot S., **28**, p. 26.
- ▶ Les Journées Accélérateurs 2011 Cros B., Kircher F., Revol J.L., **30**, p. 26.

Libres opinions

- ▶ Piloter ou subir ? Face aux « nouvelles manières de faire de la science », est-il trop tard pour choisir ? Gaillard M., **30**, p. 34.

Livres : notes de lecture

- ▶ *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?*, par F. Laloë Raimond J.M., **28**, p. 34.
- ▶ *Le journal de Fanny*, par A. Rouet Basdevant J.L., **28**, p. 35.
- ▶ *A Physical Introduction to Suspension Dynamics*, par É. Guazzelli et J.F. Morris Hulin J.P., **29**, p. 35.
- ▶ *Climat : le vrai et le faux*, par V. Masson-Delmotte Poitou J., **30**, p. 32.
- ▶ *Les milieux granulaires – Entre fluide et solide*, par B. Andreotti, Y. Forterre et O. Pouliquen Guyon É., **30**, p. 32.
- ▶ *Tchernobyl, 25 ans après... Fukushima. Quel avenir pour le nucléaire ?*, par M. Chouha et P. Reuss Soulié E., **30**, p. 33.
- ▶ *Hydrodynamic instabilities*, par F. Charru Hulin J.P., **30**, p. 33.
- ▶ *La couleur dans tous ses états*, par B. Valeur Daussy C., **31**, p. 34.
- ▶ *Le Credo antinucléaire : Pour ou contre ?*, par P. Bacher Balian R., **31**, p. 34.
- ▶ *Physics in Daily Life*, par L.J.F. Hermans Guyon É., **31**, p. 35.



« Doubles-croches – Au fil des jours, au gré des rencontres »

Yves Quéré (Éditions Le Pommier, collection Impromptus, 2010, 256 p., 23,90 €).

Anodines anecdotes, insouciantes récits, facétieuses fables, curieux contes ou sérieux essais ?

D'un ton léger, Yves Quéré nous convie, dans une série de petits textes enjoués, à partager avec lui quelques « instants de vie » qui l'ont marqué, quelques rencontres qui l'ont interpellé, quelques réflexions qui ont traversé son esprit. Mais son invitation ne s'arrête pas à l'évocation de souvenirs ou de pensées... Subrepticement, après une brève mise en situation suivie d'un récit vivant, chaque extrait appelle le lecteur à une émotion, à une interrogation, à une méditation, beaucoup plus graves et sérieuses qu'on ne pourrait s'y attendre de prime abord !

Yves Quéré, membre de l'Académie des sciences, est connu pour sa riche carrière scientifique, partagée entre recherche et enseignement, mais aussi par son action dynamique pour promouvoir « la main à la pâte », opération entreprise au côté de Georges Charpak et de Pierre Léna, et destinée à mettre en place la rénovation de l'enseignement des sciences à l'école et au collège.

La vie d'Yves Quéré est non seulement baignée de science, mais également, et ce depuis son enfance, de musique et de littérature. Curieux et émerveillé de tout, il trouve plaisir à puiser ses références dans toutes les formes de culture, et c'est ce qui donne tant de richesse à son propos tout au long de l'ouvrage.

L'auteur justifie le choix du titre de l'ouvrage dans son introduction : à l'instar de ces petites notes ponctuant une mélodie qui nous charment si nous y prêtons l'oreille, certains instants de nos vies interpellent si nous y prêtons attention. Ne nous fions pas à leur apparente insignifiance : leur valeur est dans leur capacité à « réveiller notre attention au monde ».

Doubles-croches est un livre à déposer près d'un fauteuil confortable. Au gré de petits moments de liberté, ouvrez-le à n'importe quelle page et répondez à l'invitation qui vous est faite. Laissez-vous entraîner à la rencontre d'Andrei Sakharov accueilli à bras ouverts dans un Macdonald lyonnais... amuser par l'histoire de l'attaché-case... émouvoir à l'évocation d'une lettre de Leibniz. Surtout, laissez-vous séduire par la richesse du langage, la vivacité du style, la délicatesse de l'humour, la finesse de la réflexion...

À la fermeture du livre, prenez quelques instants pour interroger votre propre existence : elle vous répondra certainement par un de ces petits clins d'œil qui en constituent le sel.

Virginie Moisy-Maurice

Professeure de Sciences à l'Hôpital Saint-Jacques de Nantes

Courrier des lecteurs

Sur l'anomalie de Bouguer

C'est une bonne idée d'avoir consacré un article à Pierre Bouguer dans *Reflets de la Physique* de janvier 2013, montrant les différentes facettes de son activité scientifique, qui s'inscrit tout à fait dans la tradition du siècle des Lumières, des mathématiques à la physique fondamentale et appliquée.

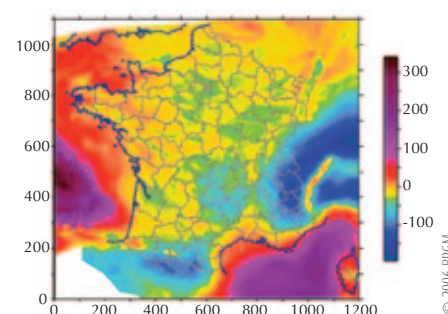
J'ai néanmoins été surpris de n'y trouver, dans le paragraphe consacré à ses activités en géophysique, aucune mention de l'anomalie gravimétrique qui perpétue son nom auprès de tous les spécialistes des sciences de la Terre : l'anomalie de Bouguer en un point est l'écart entre la pesanteur théorique calculée au point correspondant sur l'ellipsoïde de référence, et la pesanteur mesurée et corrigée des effets de la rotation de la Terre (correction de latitude), de l'altitude (correction « à l'air libre » de Faye) et du relief (correction de Bouguer).

L'anomalie de Bouguer, dont il existe des cartes (voir, par exemple, www.sgpk.ethz.ch/publication/pubsum34.htm), donne ainsi accès aux variations de densité du sous-sol en s'affranchissant des effets du relief, prépondérants dans les variations de la pesanteur.

Il est remarquable que les Alpes apparaissent en négatif sur la carte de l'anomalie de Bouguer (figure ci-contre), ce qui ne devrait pas se produire puisque le relief est compensé dans son calcul : c'est, je crois, la manifestation claire de l'isostasie, phénomène qui fait que la croûte continentale (moins dense) s'enfonce plus profondément dans le manteau (plus dense) au droit des montagnes, créant ainsi localement une zone de plus faible densité et donc une anomalie de Bouguer négative.

Philippe Lebrun

Membre de la SFP, Division « Physique des accélérateurs et technologies associées »



Anomalie de Bouguer sur la France (en 10^5 m/s²), cartographiée à partir d'une grille de maille 4 x 4 km (d'après Grandjean *et al.*, 1998). Les abscisses et ordonnées sont indiquées en km.

Chère lectrice, cher lecteur,

Ce numéro de *Reflets de la physique* « nouvelle formule », adressé à tous les membres de la Société Française de Physique, est aussi, comme le précédent, diffusé gratuitement à l'ensemble des destinataires des *Images de la Physique*, revue du CNRS.

Nous sommes convaincus qu'en le lisant, vous aurez pu apprécier la qualité et la variété des articles de notre revue : articles longs portant sur des avancées de la recherche dans des domaines très variés de la physique (supraconductivité, physique des plasmas, physique et médecine), sur l'histoire des sciences (la genèse de l'atome de Bohr), ou sur des sujets intéressant directement le fonctionnement de la société (climat et effet de serre, expérience pédagogique en école primaire) ; mais aussi articles courts, tribune libre sur ce que pourrait être la physique du 21^e siècle, portrait d'une ingénieure de recherche, nouvelles de la Société Française de Physique, note de lecture, courrier des lecteurs.

Le prochain numéro aura un caractère très différent : ce sera un numéro spécial d'environ 80 pages et 15 articles, édité conjointement avec le *Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et Chimie*, et consacré aux applications du rayonnement synchrotron. Il ne sera diffusé qu'aux membres de la SFP et de l'UdPPC ; mais vous pourrez le commander en version sur papier (tirage limité) ou en version électronique.

En juillet, vous retrouverez la formule actuelle avec, en particulier, deux articles des *Images de la Physique* portant sur le sujet de la microfluidique, un article sur les effets d'irradiation dans les matériaux, et un autre sur les phénomènes d'auto-organisation dans les plasmas froids.

Comme annoncé dans l'éditorial du numéro 32, ce numéro de juillet et les suivants seront diffusés sur abonnement, avec un tarif préférentiel pour les personnels des unités de recherche CNRS (voir l'encart inséré dans ce numéro et le site de la revue www.refletsdelaphysique.fr).

Nous espérons que vous serez nombreux à vous abonner ou, mieux, à adhérer à la SFP.

Gérard Bonneaud
Directeur de publication

Charles de Novion
Rédacteur en chef

À PARAÎTRE

Le rayonnement synchrotron et ses applications

Ce numéro spécial (n° 34) de *Reflets de la physique* sera publié conjointement avec le *Bulletin de l'Union des professeurs de Physique et de Chimie* et paraîtra en mai 2013.

Après une introduction sur les synchrotrons à électrons, sources de lumière, onze articles présenteront une sélection de résultats récents obtenus sur les synchrotrons SOLEIL et ESRF, en imagerie, analyse de structures à différentes échelles, et spectroscopie des molécules et des solides. Le dossier se conclura par un aperçu des actions de ces deux sources en direction de la société (scolaires, grand public, patrimoine culturel, industrie).



© SOLEIL - Christophe Kermarrec

Vue aérienne du synchrotron SOLEIL, à Saint-Aubin (91).



© G. Duvenoy, INSGN STUDIO, ESRF

Mise en place d'un échantillon dans une ligne de lumière de l'ESRF, à Grenoble (38).

www.sfp2013.fr



SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE

MARSEILLE
2013

22^{ème} CONGRÈS GÉNÉRAL

de la Société
Française
de Physique

du 1^{er} au 5 Juillet 2013
MARSEILLE

Président du Comité Scientifique :
Jean-François JOANNY

Président du Comité d'Organisation :
Dave LOLLMAN

FACULTÉ DES SCIENCES
AIX-MARSEILLE UNIVERSITÉ
CAMPUS SAINT CHARLES
3 place Victor Hugo - 13003 Marseille



Informations et logistique
Atout Organisation Science
Tél. 04 96 15 12 50
sfp2013@atout-org.com

