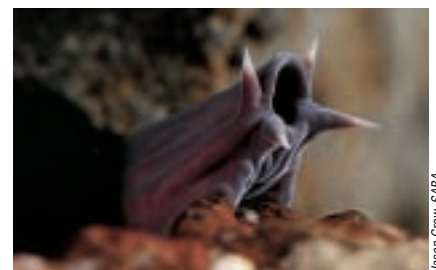




Jason Grow, SABA



Jason Grow, SABA



Jason Grow, SABA



John B. Heiser, Cornell University

5. MYXINES de l'Aquarium de San Francisco (à gauche et en haut à droite). Le plaque dentaire est disséquée au milieu à droite. En bas à droite, on voit le gel produit par une myxine qui vient d'être pêchée.

médiane dorsale et le long de la surface ventrale, au niveau des glandes à mucus. Ainsi, chaque myxine fournit une longue bande présentant une zone plissée, le long de la ligne médiane, marquant l'emplacement des insertions musculaires.

La demande de peaux de myxines a fait fleurir des entreprises sur toutes les côtes de l'Amérique du Nord. La bande de peau doit avoir une largeur minimale (environ cinq centimètres), mais elle ne doit pas être trop épaisse. Toutes les espèces ne conviennent donc pas : certaines sont trop petites ou trop minces, d'autres trop larges, et d'autres encore ont la peau trop épaisse.

La pêche est simple : on appâte des nasses, reliées à une ligne de fond, avec à peu près n'importe quoi, du hareng endommagé aux déchets de cuisine. Laissées en place pendant une nuit, ces nasses peuvent être de gros seaux munis d'un couvercle ou des fûts percés de petits trous sur les côtés. Une fois à l'intérieur, la plupart des myxines sont piégées dans l'appât et dans leur propre mucus. Dans des zones non exploitées, on a compté plus de 100 myxines prises au cours de la première heure de pose de la nasse sur le fond.

Toutefois les myxines ont été excessivement pêchées ; certaines espèces se sont raréfiées, et les pêcheurs ont dû capturer des espèces qu'ils délaissaient jusqu'alors. En Nouvelle-Angleterre, les pêches annuelles de myxines, nulles en 1991, ont atteint 1950 tonnes en 1996. Pendant ces cinq années, près de 50 millions de myxines ont été traitées et envoyées à l'étranger. Les pêcheurs rejettent les myxines de moins de 500 millimètres de long (la longueur minimale convenant pour le cuir) qui meurent quand elles sont rejetées dans les eaux plus chaudes de la surface. Aussi, le véritable impact de la pêche sur les populations de myxines est bien supérieur à celui indiqué uniquement par les captures. Depuis 1996, la pêche de la myxine a décliné, leur taille moyenne a diminué, ainsi que le nombre moyen par nasse.

La raréfaction des myxines ne cessera pas, car, sur la plupart des côtes, les myxines sont considérées comme des « espèces sous exploitées » et leur exploitation est en général autorisée sans restriction. Ainsi, en Nouvelle-Angleterre, la pêche à la myxine était considérée comme une industrie en pleine expansion quand les autres pêches s'effondraient.

Bien que les myxines soient plus abondantes qu'on ne le pensait naguère, ces espèces sont trop mal connues pour qu'on en propose une exploitation durable. En attendant, les États devraient imposer des mesures simples (les nasses devraient avoir des trous qui laisseraient s'échapper les jeunes spécimens) pour diminuer l'impact des pêches sur les populations. En réduisant considérablement le nombre de n'importe quelle espèce, même les plus modestes myxines, nous accomplissons une expérience à grande échelle sur l'écosystème. Quelles en seront les conséquences ?

Frederic MARTINI travaille à l'Université de Manoa, à Hawaï.

The Biology of Myxine, sous la direction d'Alf Brodal et Ragnar Fänge, Universitetsforlaget, Oslo, 1963.

David JENSEN, *The Hagfish*, in *Scientific American*, vol. 214, n° 2, pp. 82-90, février 1966.

Aubrey GORBMAN et al., *The Hagfishery of Japan*, in *Fisheries*, vol. 15, n° 4, pp. 12-18, juillet 1990.

The Biology of Hagfishes, sous la direction de J.M. Jørgensen, J.P. Lomholt, R.E. Weber et H. Malte, Chapman & Hall, 1998.

L'hydrogène métallique

WILLIAM NELLIS

En recréant les conditions qui règnent dans le noyau de Jupiter, on obtient l'hydrogène sous la forme d'un métal.

Le canon à gaz du Laboratoire Lawrence Livermore, en Californie, mesure une vingtaine de mètres de longueur et il contient assez d'hydrogène pour exploser aussi violemment que dix bâtons de dynamite. Les projectiles qu'il tire ont une vitesse maximale de sept kilomètres par seconde, soit plus de 20 fois la vitesse du son et environ 15 fois celle d'une balle de fusil. Cet engin n'est pourtant pas une arme, mais un instrument de recherche. Il ne prend pour cible que quelques gouttes de liquide.

Ce liquide est fait de l'élément le plus commun de l'Univers : l'hydrogène. Malgré une structure très simple (l'atome est composé d'un proton et d'un électron), l'hydrogène a un comportement beaucoup plus complexe qu'on ne l'imaginait. Aux températures et pressions ambiantes, l'hydrogène est un gaz constitué de molécules à deux atomes, mais il devient liquide aux températures inférieures à 20 kelvins (-253°C) et solide au-dessous de 14 kelvins. Dans ces divers états, l'hydrogène est un isolant électrique. Cependant, à la fin du XIX^e siècle, des physiciens calculèrent que l'hydrogène fortement comprimé se dissocierait et deviendrait métallique. Il se trouve d'ailleurs dans la première colonne de la Classification périodique des éléments : celle des métaux alcalins.

Dès 1898, le physicien écossais James Dewar liquéfia de l'hydrogène ; Il le solidifia un an plus tard, mais, à la surprise générale, les phases condensées se révélèrent isolantes : l'hydrogène restait sous la forme de molécules diatomiques et se comportait comme les halogènes de la septième colonne de la Classification périodique (le fluor,

le chlore...). Avec la mécanique quantique, de nouvelles théories du comportement de l'hydrogène apparurent. En 1935, à l'Université Princeton, Eugene Wigner utilisa cette théorie pour confirmer que le solide moléculaire diatomique isolant devait se transformer en un solide monoatomique métallique à une pression suffisamment élevée. Plus tard, on estima que cette pression serait comprise entre 25 à 2 000 gigapascals, soit d'environ 250 000 à 20 millions de fois la pression atmosphérique au niveau de la mer. Selon des calculs plus récents, l'hydrogène moléculaire solide deviendrait métallique à partir de 400 gigapascals, soit environ quatre millions d'atmosphères, tandis que, d'après des mesures par diffraction des rayons X, la pression de transition serait de 620 gigapascals environ.

On obtient de telles pressions, voisines de celles qui règnent au centre de la Terre, en comprimant des échantillons entre deux surfaces extrêmement dures. Ainsi, dans les cellules à enclumes de diamant, la pression atteint 500 gigapascals (voir *La cellule à haute pression à enclumes de diamant*, par A. Jayaraman, *Pour la Science*, juin 1984). En utilisant de telles cellules, Russel Hemley et Ho-kwang Mao, de l'Institution Carnegie de Washington, Isaac Silvera, de l'Uni-

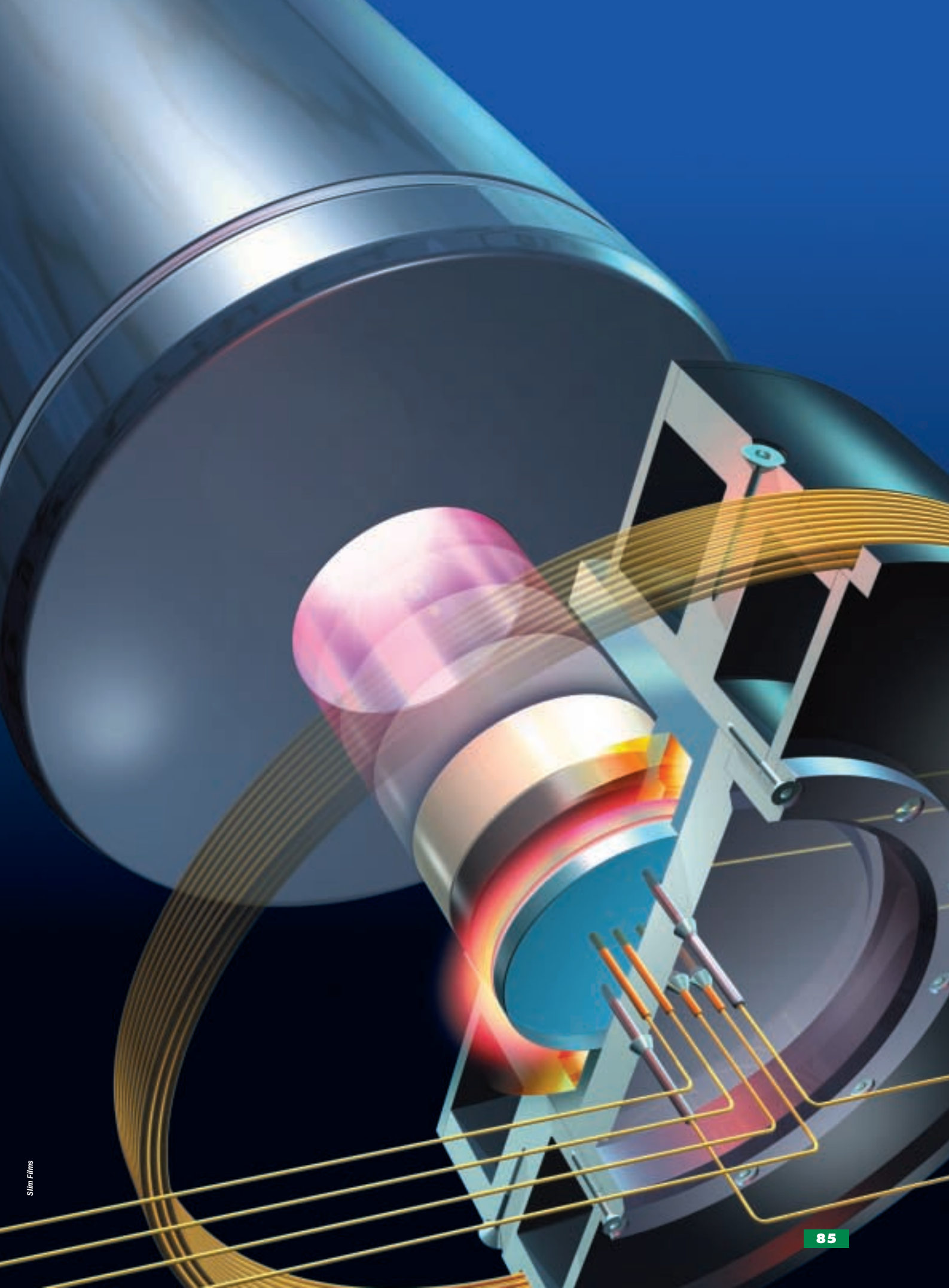
versité Harvard, et Arthur Ruoff, de l'Université Cornell, ont tenté de rendre l'hydrogène métallique en le soumettant à une pression de 340 gigapascals. Bien que l'hydrogène se soit solidifié, les physiciens n'ont pas mesuré sa conductivité électrique, car les instruments se sont brisés sous l'effet de la pression. En outre, ils n'ont pas rendu l'hydrogène liquide métallique, car celui-ci diffuse rapidement à travers les parois de la cellule.

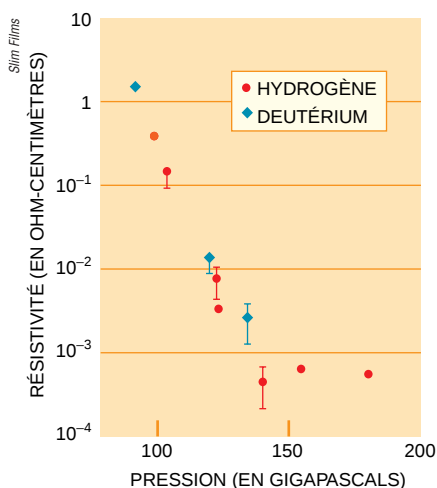
En utilisant le canon à gaz de Livermore, mes collègues et moi-même sommes parvenus à comprimer de l'hydrogène liquide à tel point qu'il se transforme en métal liquide. Il reste dans cet état moins d'un millionième de seconde, mais c'est assez pour mesurer sa conductivité. Bien que nous n'ayons pas encore créé d'hydrogène métallique solide, nos résultats donnent un aperçu du comportement de l'hydrogène à des pressions et à des températures extrêmes.

Feu sur l'hydrogène !

Nous avons commencé nos expériences avec le canon à gaz il y a environ dix ans. Cet appareil, mis au point par la Société *General Motors* pour des recherches en balistique, date des années 1960.

1. UN IMPACT VIOLENT engendre une onde de choc qui comprime un échantillon d'hydrogène liquide jusqu'à ce qu'il devienne métallique. Un canon à gaz (*en haut*) accélère un projectile (un petit disque métallique sur un support en plastique) jusqu'à une vitesse de sept kilomètres par seconde. Lorsque le projectile frappe le porte-échantillon (*représenté en coupe, en bas*), il crée une onde de choc dans la couche d'hydrogène liquide (*en jaune*). Cette onde se réverbère entre deux plaques de saphir (*seule l'une d'elles est visible, en bleu*), comprimant l'hydrogène à des pressions qui atteignent 180 gigapascals. Les sondes de déclenchement violettes activent le dispositif d'enregistrement, et les électrodes (*en orange*) mesurent la conductivité de l'hydrogène pour déterminer le moment où il devient métallique.





2. LA RÉSISTIVITÉ DE L'HYDROGÈNE LIQUIDE diminue quand la pression augmente. À des pressions comprises entre 93 et 120 gigapascals, l'hydrogène liquide est semi-conducteur, mais, à partir de 140 gigapascals, il devient métallique (sa résistivité diminue jusqu'à 0,0005 ohm-centimètre). Le deutérium, un isotope de l'hydrogène, se comporte de la même façon.

Une version plus grande du canon a accéléré des modèles réduits de missiles, afin de tester les effets de la rentrée dans l'atmosphère à haute vitesse. Le Laboratoire Lawrence Livermore a finalement acquis le petit canon, car il permet de soumettre les matériaux à des conditions extrêmes et, notamment, d'étudier la conductivité de l'hydrogène fluide.

Lorsque la pression de l'hydrogène augmente, sa température de fusion s'élève, dépassant 1 500 kelvins sous une pression de 100 gigapascals : on doit le chauffer pour éviter qu'il ne se solidifie. Afin de comprimer et de chauffer l'hydrogène en même temps, on utilise une onde de choc, telle celle que crée un avion lorsqu'il franchit le mur du son : une onde de choc est une variation soudaine de pression qui comprime les molécules très rapidement, augmentant ainsi leur température. En 1991, nous avons commencé à utiliser le canon à gaz pour produire une onde de choc qui se réverbérerait dans l'hydrogène liquide.

Au premier étage du canon, une culasse remplie de poudre à canon (jusqu'à 3,3 kilogrammes) met en mouvement un piston dans un tube de dix mètres de long et de neuf centimètres de diamètre (voir la figure 3). Ce tube contient 60 grammes d'hydrogène gazeux (ce n'est pas celui que l'on cherche à rendre métallique). Le piston, qui pèse 6,8 kilogrammes, comprime l'hydrogène jusqu'à 0,1 gigapascal,

avant que la pression ne déclenche l'ouverture d'une valve. L'hydrogène pénètre alors dans le second étage du canon, constitué d'un cylindre de neuf mètres de long et de 2,8 centimètres de diamètre. Comme il est plus étroit que le tube précédent, la différence de volume accélère le gaz.

Après avoir franchi la valve, le gaz pousse un projectile (l'hydrogène est le meilleur accélérateur de projectile qui soit, car sa masse molaire est plus faible que celle des autres gaz). Cette petite plaque métallique, qui pèse 20 grammes, atteint sept kilomètres par seconde, soit plus de 25 000 kilomètres par heure. À l'extrémité du cylindre, elle frappe un porte-échantillon en aluminium contenant une couche d'hydrogène liquide entre deux plaques de saphir. Avant l'impact, on refroidit l'hydrogène à 20 kelvins, pour augmenter sa densité.

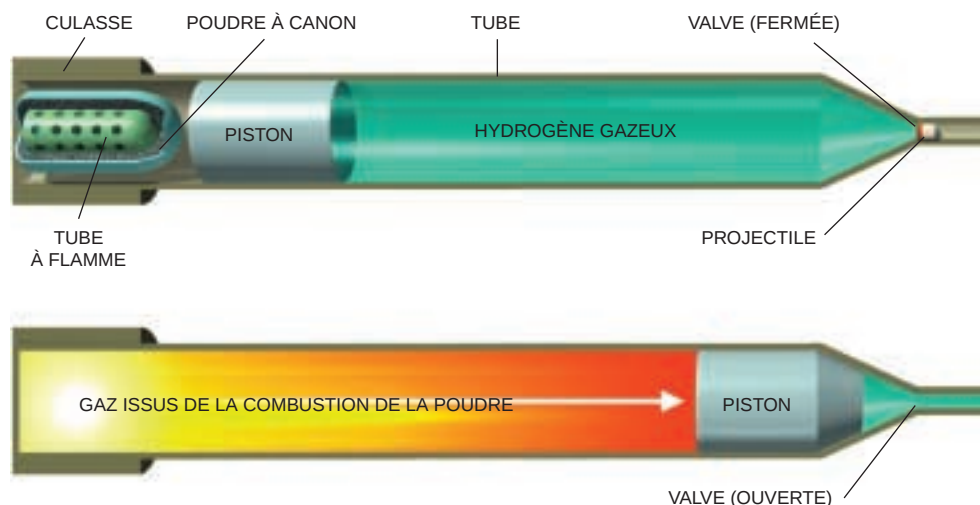
L'impact engendre une onde de choc puissante, qui traverse le porte-échantillon et l'hydrogène liquide. Les plaques de saphir la réfléchissent, de sorte qu'elle se réverbère plus de dix fois sur l'hydrogène, créant des pressions de 180 gigapascals et des températures de 3 000 kelvins. La réverbération de l'onde de choc et la pression qu'elle crée dans l'hydrogène sont les clés du succès de l'expérience : si l'on soumettait l'hydrogène à une seule onde de choc, il chaufferait beaucoup trop.

Dans le porte-échantillon, une sonde de déclenchement active le dispositif d'enregistrement dès qu'elle détecte que la première onde de choc a pénétré dans l'hydrogène. Bien que l'échantillon ne

soit soumis à la pression maximale que pendant environ 100 nanosecondes (soit un dixième de millionième de seconde), l'hydrogène a le temps d'atteindre l'équilibre thermique. En revanche, il n'a pas le temps de diffuser hors du porte-échantillon ou de réagir chimiquement avec ce dernier.

Cette expérience n'est pas sans danger. Nous nous sommes assurés que l'hydrogène gazeux du canon ne se mélangerait pas avec l'oxygène de la chambre cible, car s'ils réagissaient ensemble, ils libéreraient la même énergie que l'explosion de deux kilogrammes de TNT. Notamment, nous avons vérifié que la chambre cible était assez solide pour supporter l'impact. Nous avons aussi conçu notre expérience de sorte que, si de l'air s'infiltrait, il ne suffirait pas à déclencher une explosion. Nous coupons le courant dans les appareils de mesure de la chambre cible juste après la mise à feu du canon, pour qu'aucune étincelle ne puisse enflammer l'hydrogène. En outre, après chaque tir, nous introduisons de l'azote dans la chambre cible afin de diluer l'hydrogène restant dans un gaz inerte.

Avec cette expérience, nous pensions observer de l'hydrogène fluide dans un état proche de l'état métallique, mais nous n'imaginions pas atteindre ce dernier état. Pour déterminer la conductivité électrique de l'hydrogène liquide, nous avons envoyé un faible courant dans les électrodes du porte-échantillon. Ainsi, nous avons mesuré une résistivité (la résistance d'un fil métallique à un courant électrique est égale à sa résistivité multipliée par sa



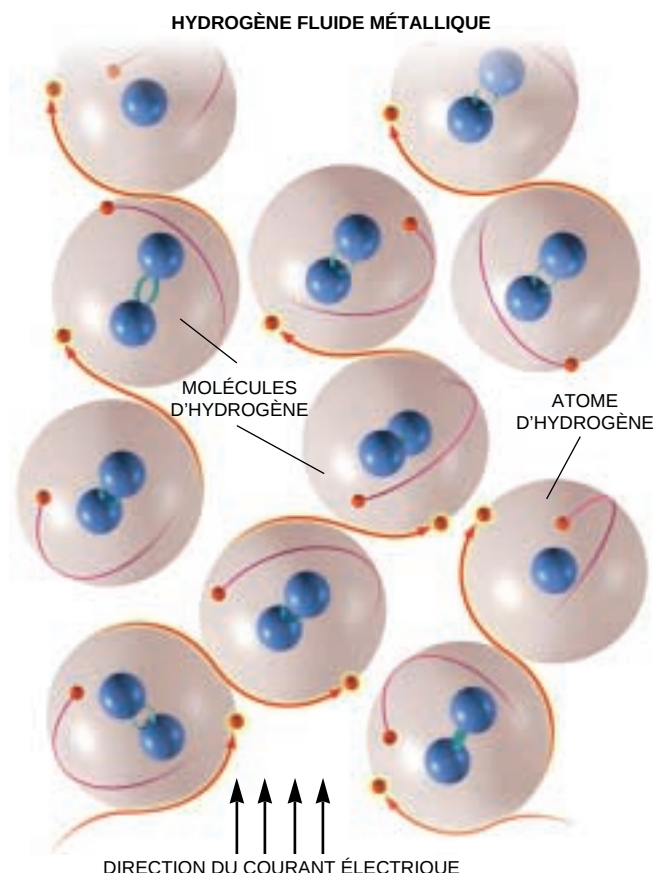
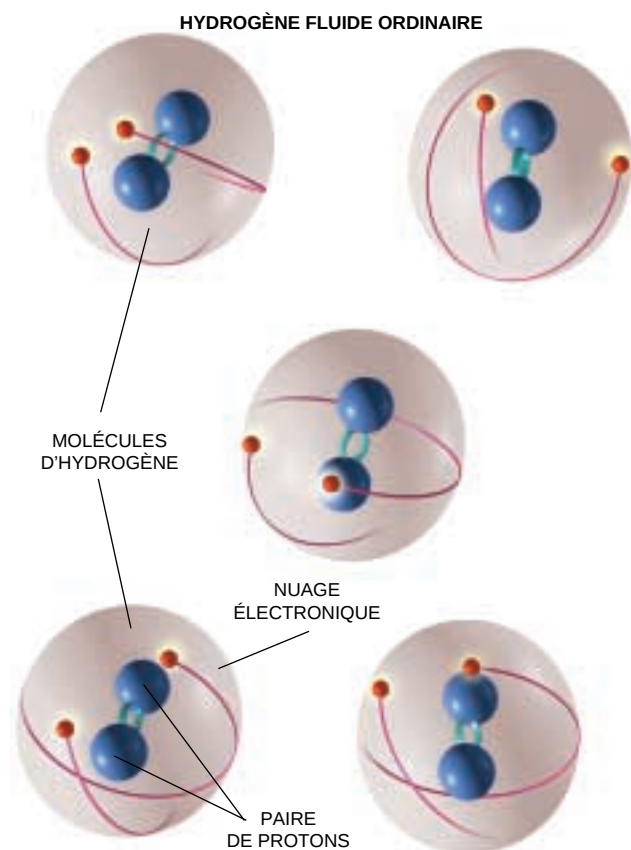
3. LE CANON À GAZ est constitué d'une culasse et d'un tube qui se prolonge par un cylindre plus étroit. Avant la mise à feu, la culasse contient 3,3 kilogrammes de poudre à canon (*en haut*). Quand la poudre s'enflamme, les gaz brûlants issus de l'explosion poussent un pis-

longueur et divisée par l'aire de sa section transversale), à 93 gigapascals, d'environ un ohm-centimètre et, à 120 gigapascals, d'environ 0,005 ohm-centimètre. Ces valeurs, inférieures à celles des isolants, mais supérieures à

celles des métaux, correspondent aux matériaux semi-conducteurs. Lorsque nous avons augmenté la pression jusqu'à 140 gigapascals, la résistivité de l'hydrogène liquide a diminué jusqu'à 0,0005 ohm-centimètre, ce qui indi-

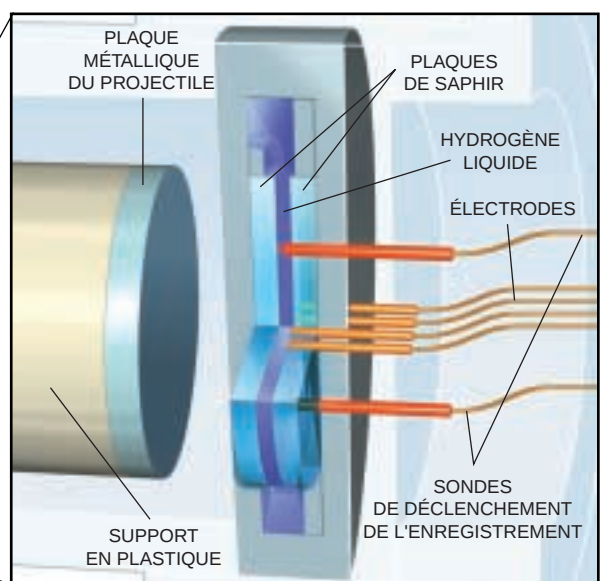
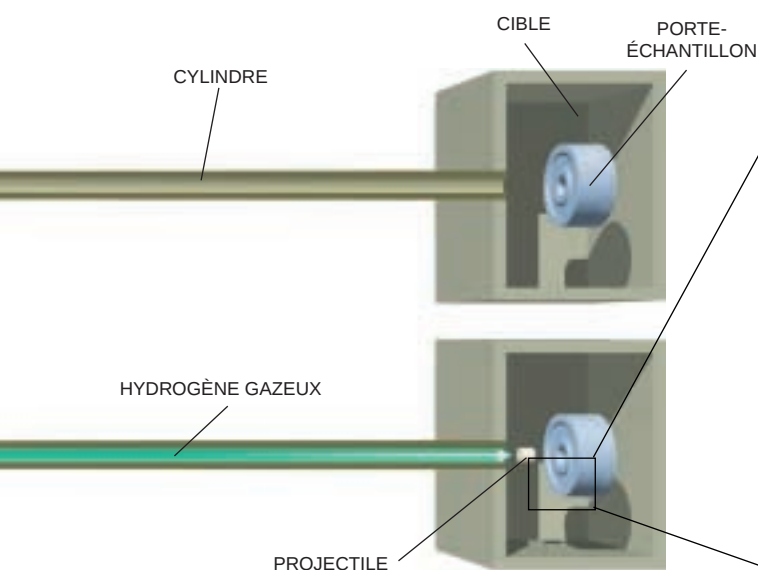
quait qu'il était devenu métallique. Au-delà (jusqu'à 180 gigapascals), elle n'a plus baissé.

Ces résultats nous ont tant surpris que nous avons retardé leur publication. Évidemment, nous avons refait



4. DANS LES MOLÉCULES D'HYDROGÈNE LIQUIDE ORDINAIRE (à gauche), les électrons (en rouge) forment un nuage négativement chargé (en gris) autour des paires de protons. À très haute pression (à droite), les

molécules se rapprochent, de sorte que les électrons passent de l'une à l'autre, créant un courant électrique quand on applique une tension au liquide. La pression dissocie également les molécules.



ton le long du tube (en bas). Le piston comprime l'hydrogène gazeux, qui déclenche l'ouverture d'une valve et jaillit dans le cylindre étroit, propulsant un projectile vers la cible. Ce projectile, une plaque

métallique sur un support en plastique, frappe le porte-échantillon en aluminium contenant l'hydrogène liquide, qui devient métallique quand la pression est suffisante.

les expériences en les modifiant, mais nous avons aussi cherché à comprendre pourquoi la résistivité était constante aux très fortes pressions. Aux basses pressions, les atomes d'hydrogène ont une forte tendance à l'appariement, de sorte que l'hydrogène liquide est entièrement moléculaire. Chaque molécule, composée de deux atomes, contient ainsi une paire de protons (positivement chargés) entourée d'un nuage électronique négativement chargé. Comme il faut une quantité d'énergie notable (15 électronvolts) pour arracher un électron à une molécule d'hydrogène, l'hydrogène moléculaire fluide ne transporte pas le courant : il est isolant. En revanche, quand les molécules d'hydrogène sont poussées les unes contre les autres par la pression et chauffées par l'onde de choc, l'énergie nécessaire pour faire sauter un électron d'une molécule à une autre diminue. La chaleur de l'onde de choc fournit cette énergie, de sorte que l'hydrogène fluide devient semi-conducteur. Sa conductivité augmente régulièrement (tandis que sa résistivité baisse) avec la pression et la tempéra-

ture. Enfin, lors du passage à l'état métallique, certains électrons se délocalisent : ils quittent leur molécule initiale et se répartissent dans tout l'échantillon (voir la figure 4).

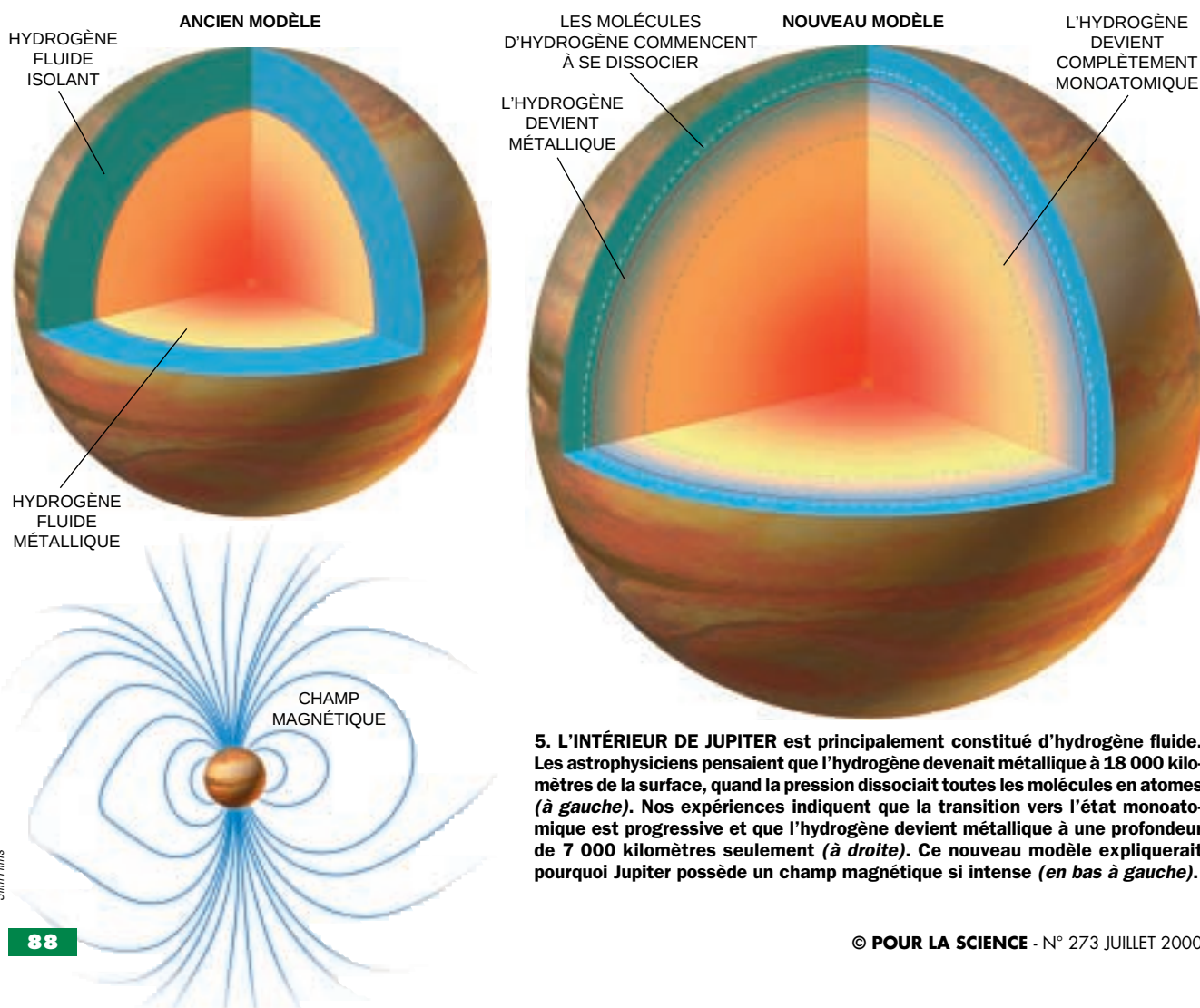
À une pression de 140 gigapascals, la masse volumique de l'hydrogène liquide est de 0,32 mole par centimètre cube, et la température est de 2 600 kelvins. L'énergie nécessaire pour faire sauter un électron d'une molécule d'hydrogène à une autre tombe à 0,22 électronvolt. Les molécules sont si proches que leurs nuages électroniques se recouvrent : les électrons passent librement de l'une à l'autre. Une augmentation supplémentaire de densité ne change rien, ce qui explique pourquoi la résistivité de l'hydrogène ne diminue plus quand on augmente encore la pression. En outre, environ dix pour cent des molécules se dissocient en atomes : l'hydrogène est sous la forme d'un mélange de molécules, d'atomes et, probablement, d'agrégats de plus de deux protons. Les collisions entre les molécules brisent constamment ces dernières en atomes, qui se recombinaient pour former de nou-

velles molécules. En raison de ce désordre, les électrons sont dispersés, et le matériau présente la «conductivité minimale» d'un métal désordonné.

Jupiter dans une bouteille

Pourquoi la pression qui conduit à la métallisation de l'hydrogène fluide est-elle inférieure à celle qui conduit à la métallisation de l'hydrogène solide? Sans doute parce que les atomes du solide se figent aux nœuds du cristal, ce qui gêne leur ionisation. Nos expériences et leurs interprétations contribuent ainsi à comprendre ce qui se passe à l'intérieur de Jupiter et de Saturne. Ces deux géantes gazeuses ont ensemble une masse 400 fois supérieure à celle de la Terre. La plus grande partie de leur hydrogène est métallique ; elle engendre les champs magnétiques de ces planètes.

Avant nos expériences, les astrophysiciens pensaient que Jupiter, sous son épaisse couche nuageuse, possédait un manteau d'hydrogène électriquement isolant, épais d'environ 18 000 kilomètres (soit un quart du



rayon de la planète) et un noyau d'hydrogène métallique liquide. Ils supposaient ainsi l'existence d'une frontière nette entre le manteau et le noyau, à une profondeur où la pression (environ 300 gigapascals) transforme l'hydrogène fluide, isolant, en hydrogène métallique, conducteur. Cependant, nos résultats indiquent que la transition entre l'hydrogène moléculaire et l'hydrogène monoatomique est progressive : l'hydrogène moléculaire commence à se dissocier à une pression de 40 gigapascals et devient complètement monoatomique à 300 gigapascals environ. La conductivité atteint celle d'un métal à 140 gigapascals et 4 000 kelvins : une telle pression devrait apparaître à une profondeur d'environ 7 000 kilomètres seulement.

Ainsi, l'hydrogène métallique à l'origine du champ magnétique de Jupiter est plus abondant qu'on ne le pensait, ce qui expliquerait pourquoi le champ de surface de la planète (environ dix gauss) est relativement fort. En comparaison, le noyau ferreux à l'origine du champ magnétique terrestre est plus profondément enfoui, car son rayon est deux fois inférieur à celui de la planète, de sorte que le champ de surface n'est que de 0,5 gauss environ.

L'étude de la métallisation de l'hydrogène devrait favoriser la mise au point de la fusion nucléaire par confinement inertiel. Dans ce type de fusion, on place une « pastille » de combustible, composée de deutérium et de tritium (les isotopes de l'hydrogène), dans une cavité qu'on irradie avec des impulsions laser très intenses. La première impulsion laser engendre une onde de choc d'environ 100 gigapascals, et les impulsions suivantes agissent comme les réverbérations de l'onde de choc dans notre expérience. Connaissant le comportement de l'hydrogène à ces pressions élevées, on améliorera l'efficacité des impulsions laser.

Nous ne sommes pas au bout des découvertes. Ainsi, si nous arrivions à fabriquer de l'hydrogène métallique solide qui, une fois produit, reste stable à pression et à température ambiantes (tout comme le carbone reste sous forme de diamant), celui-ci aurait d'innombrables applications, notamment parce qu'il serait supraconducteur. Toutefois, dans l'hydrogène, les forces de Van der Waals et, notamment, les forces de répulsion, sont importantes : les molécules ont tendance à s'éloigner les unes des autres, dès que la pression diminue. Des additifs qui se lieraient aux molécules et aux atomes d'hydrogène et les maintiendraient ensemble sans modifier leurs propriétés seraient-ils la clef de la fabrication d'hydrogène métallique solide ?

Nous spéculons déjà sur ce que nous ferions avec un tel matériau : les lignes à haute tension ne subiraient aucune perte d'énergie, les ordinateurs seraient plus rapides, les trains léviteraient sur des champs magnétiques... Aujourd'hui, les supraconducteurs fonctionnent à des températures inférieures à 150 kelvins, de sorte qu'on doit les refroidir avec de l'azote liquide, ce qui limite leurs usages. L'hydrogène métallique solide aurait une densité proche de celle de l'eau, trois fois plus légère que l'aluminium. Il servirait à fabriquer des structures ultra-légères, telles des voitures qui consommeraient beaucoup moins de carburant qu'aujourd'hui. Il emmagasinerait de grandes quantités d'énergie, qu'il libérerait en se vaporisant sans aucun danger pour l'environnement, remplaçant avantageusement soit l'essence, soit le mélange d'hydrogène et d'oxygène utilisé pour lancer les fusées. Il rendrait la fusion nucléaire viable... Désormais, l'hydrogène fait l'objet d'un paradoxe fascinant : son comportement semble extrêmement complexe, alors qu'il a la structure électronique la plus simple de tous les atomes.

William NELLIS est physicien au Laboratoire Lawrence Livermore, à Livermore, en Californie.

N. ASHCROFT, *Dense Hydrogen : The Reluctant Alkali*, in *Physics World*, vol. 8, n° 7, pp. 43-48, juillet 1995.

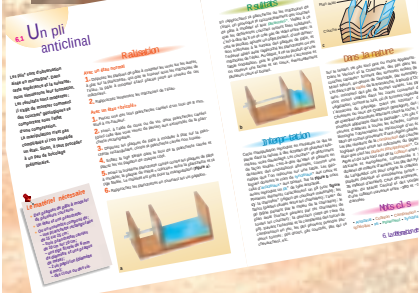
S.T. WEIR, A.C. MITCHELL et W.J. NELLIS, *Metallization of Fluid Molecular Hydrogen at 140 GPa (1.4 Mbar)*, in *Physical Review Letters*, vol. 76, n° 11, pp. 1860-1863, 11 mars 1996.

P. LOUBEYRE, R. LE TOULLEC, D. HAUSERMANN, M. HAUFLAND, R. HEINLEY, H.K. MAO et W. FINGER, *X-Ray Diffraction and Equation of State of Hydrogen at Megabar Pressures*, in *Nature*, vol. 383, n° 702, 1996.

Chandrabhas NARAYANA, Huan LOU, Jon ORLOFF et Arthur L. RUOFF, *Solid Hydrogen at 342 GPa : No Evidence for an Alkali Metal*, in *Nature*, vol. 393, pp. 46-49, 7 mai 1998.

LA TERRE

50 expériences pour découvrir notre planète



Comment naissent les dunes ?
Comment une rivière creuse-t-elle une vallée ?
Comment se forment les grottes ?
Pourquoi les pierres éclatent-elles sous le froid ?
Ce livre propose une série d'expériences pour comprendre comment le vent, la pluie, la glace, les cours d'eau modelent le visage de la Terre.

ANDRÉ PROST est géologue, ancien enseignant à l'université d'Orléans et à Paris VI, et ingénieur au Bureau des Recherches Géologiques et Minières à Orléans.

Code 2401-100 F-128 pages

Voir bon de commande page 90

BELIN • POUR LA SCIENCE