

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).

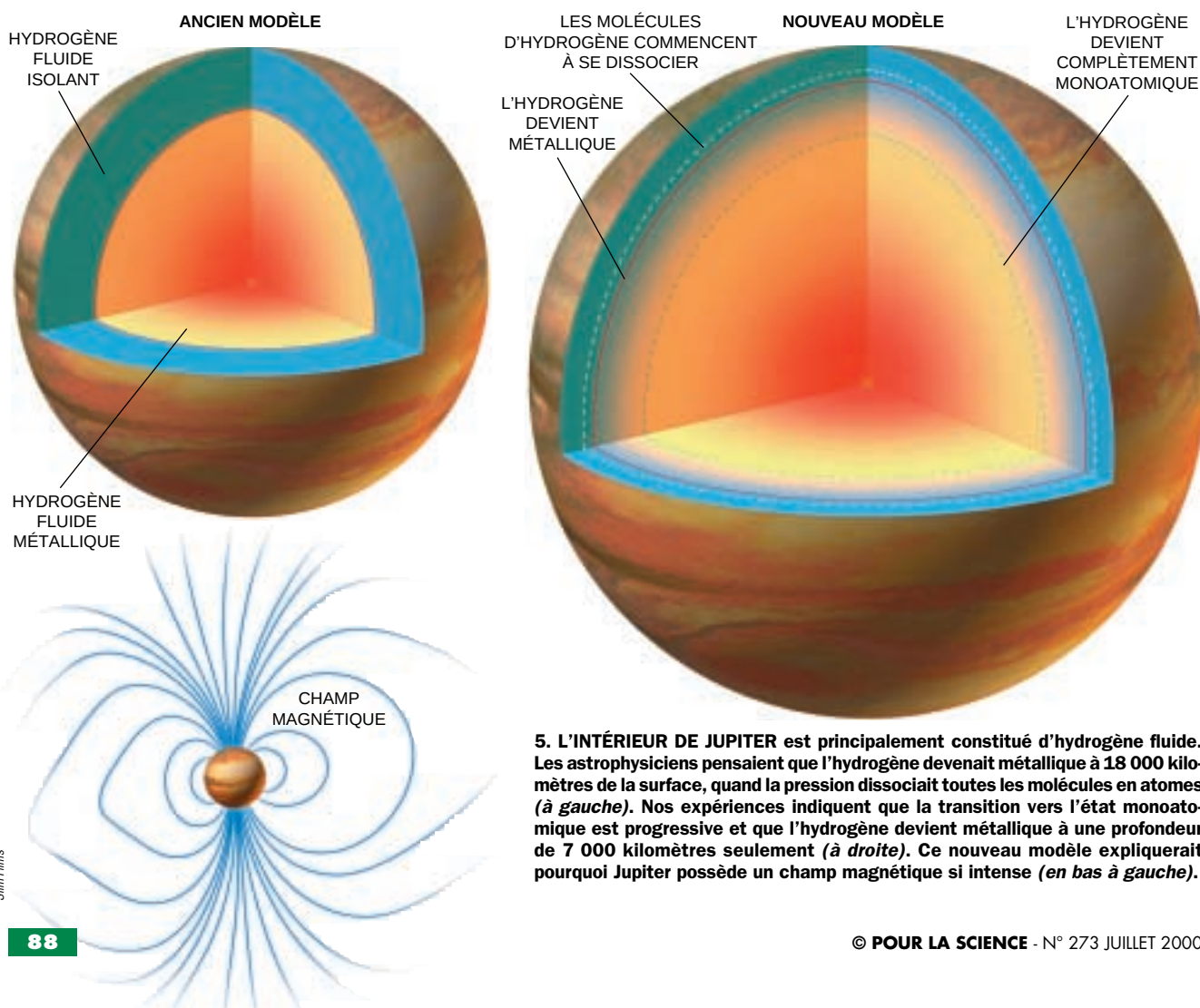
À une pression de 140 gigapascals, la masse volumique de l'hydrogène liquide est de 0,32 mole par centimètre cube, et la température est de 2 600 kelvins. L'énergie nécessaire pour faire sauter un électron d'une molécule d'hydrogène à une autre tombe à 0,22 électronvolt. Les molécules sont si proches 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.

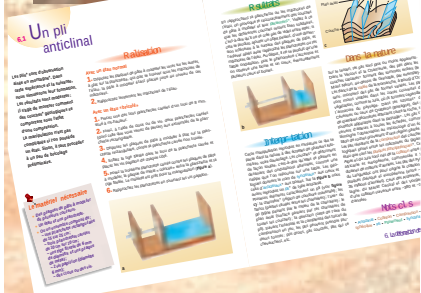
S.T. WEIR, A.C. MITCHELL et W.J. NELLIS, *Metallization of Fluid Molecular Hydrogen at 140 GPa (1.4 Mbar)*, in *Physical Review Letters*, vol. 76, n° 11, pp. 1860-1863, 11 mars 1996.

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



La logique des pirates féroces

IAN STEWART

Un problème de partage que l'intuition seule ne résout pas.

La logique conduit parfois à des conclusions étranges. Pourtant, si un raisonnement est sans faille, ses conclusions doivent être justes, même quand elles contredisent l'intuition. Stephen Omohundro m'a envoyé de Californie un problème connu depuis une dizaine d'années, mais qu'il a modifié, de sorte que seule la logique – et non l'intuition – guide la recherche de la solution. Voyons d'abord la version originale du

problème. Dix pirates ont mis la main sur un trésor de 100 pièces d'or et veulent se le partager. Démocrates à leur manière, les pirates font le partage de la façon suivante : le plus féroce propose une répartition et tous votent, lui inclus. Si au moins 50 pour cent des avis sont favorables, la proposition passe ; sinon, son auteur est jeté par-dessus bord et la procédure se répète avec le plus féroce des pirates restants.

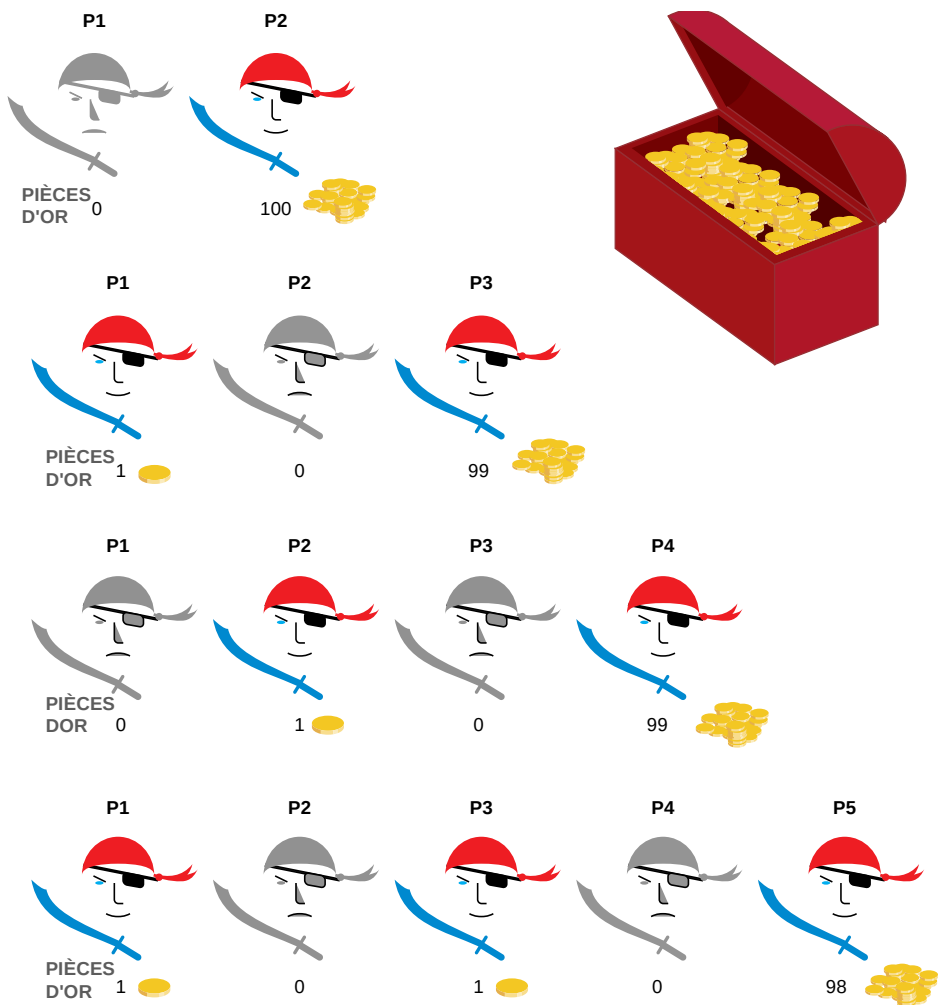
Tous les pirates aiment jeter leurs compagnons par-dessus bord, mais, s'ils ont le choix, ils préfèrent les espèces sonnantes et trébuchantes. Ils détestent évidemment être jetés par-dessus bord eux-mêmes. Tous sont rationnels et savent que les autres le sont aussi. De plus, les férociétés des divers pirates ne sont jamais égales, de sorte qu'il existe une hiérarchie de férocité connue de tous. Les pièces d'or sont indivisibles et les arrangements en sous-main sont impossibles, car aucun pirate n'a confiance en ses compagnons : chacun pour soi.

Quelle proposition le plus féroce des pirates doit-il faire pour récupérer le plus d'or possible ? Commençons par numéroter les pirates par ordre de férocité croissante : le moins féroce est le numéro un, et le plus féroce, le numéro dix.

Dans ce type de jeu, on trouve une solution en partant de la fin et en remontant vers l'énoncé du problème. À cet instant, on sait quelles décisions étaient bonnes ou mauvaises ; on peut donc appliquer ce savoir à l'avant-dernière décision et ainsi de suite. Au contraire, une recherche en sens direct ne mène pas loin, car elle bute toujours sur la question : « Que fera le suivant si je fais ceci ? »

Conformément à cette idée, commençons par examiner la situation où deux pirates P1 et P2 restent seuls à bord, tous les autres ayant été jetés par-dessus bord. Le plus féroce est P2, et la proposition la plus avantageuse qu'il puisse faire est la suivante : il propose 100 pièces d'or pour lui et aucune pour P1. Comme il a au moins 50 pour cent des voix, sa proposition passe.

Ajoutons le pirate P3. P1 sait – et P3 sait qu'il sait – que, si la proposition de P3 est rejetée, le jeu continuera avec P2 seulement et que ce dernier fera une proposition de 100 pièces pour lui tout seul. Aussi P3 sait que P1 acceptera toute proposition qui rapportera quelque chose à P1. P3 cède le moins possible d'or : il propose 99 pièces pour lui, rien pour P2 et une pièce pour P1 (voir la figure 1).



1. Les pirates les plus féroces se taillent la part du lion quand le butin est partagé entre trois, quatre ou cinq pirates.