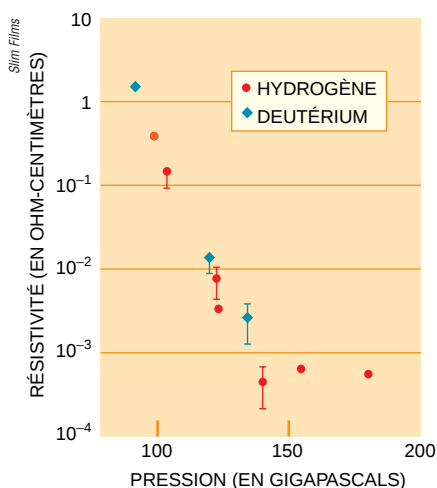




2. LA RÉSISTIVITÉ DE L'HYDROGÈNE LIQUIDE diminue quand la pression augmente. À des pressions comprises entre 93 et 120 gigapascals, l'hydrogène liquide est semi-conducteur, mais, à partir de 140 gigapascals, il devient métallique (sa résistivité diminue jusqu'à 0,0005 ohm-centimètre). Le deutérium, un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

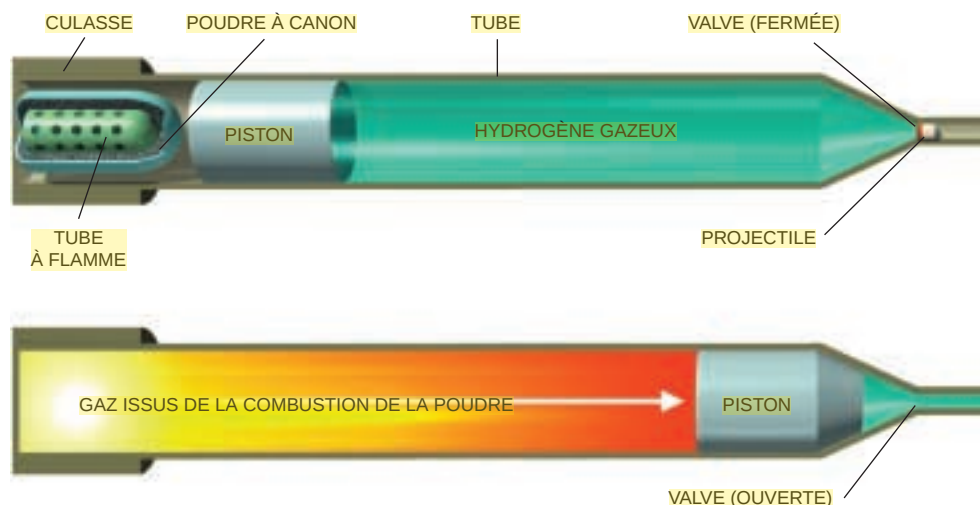
L'impact engendre une onde de choc puissante, qui traverse le porte-échantillon et l'hydrogène liquide. Les plaques de saphir la réfléchissent, de sorte qu'elle se réverbère plus de dix fois sur l'hydrogène, créant des pressions de 180 gigapascals et des températures de 3 000 kelvins. La réverbération 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



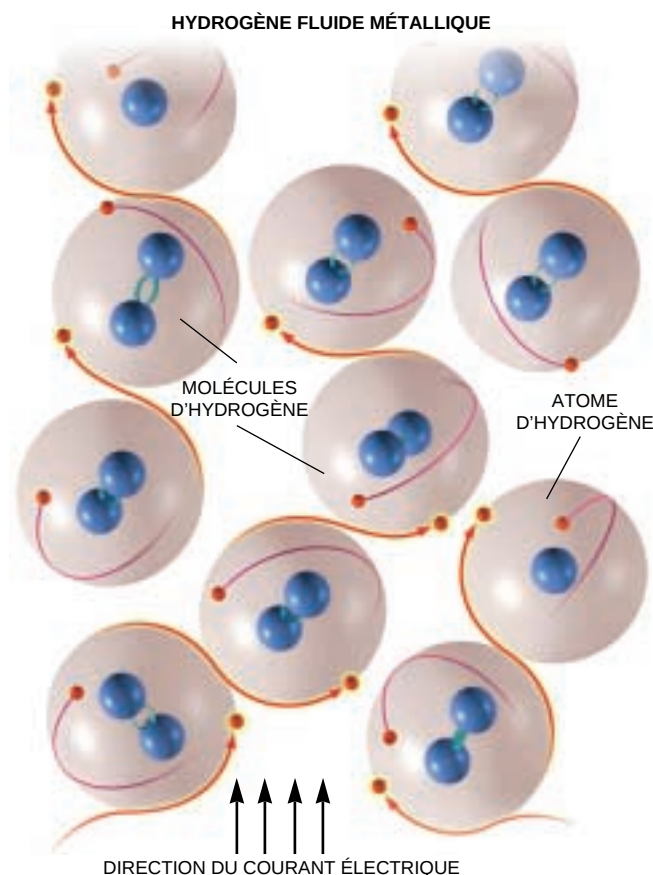
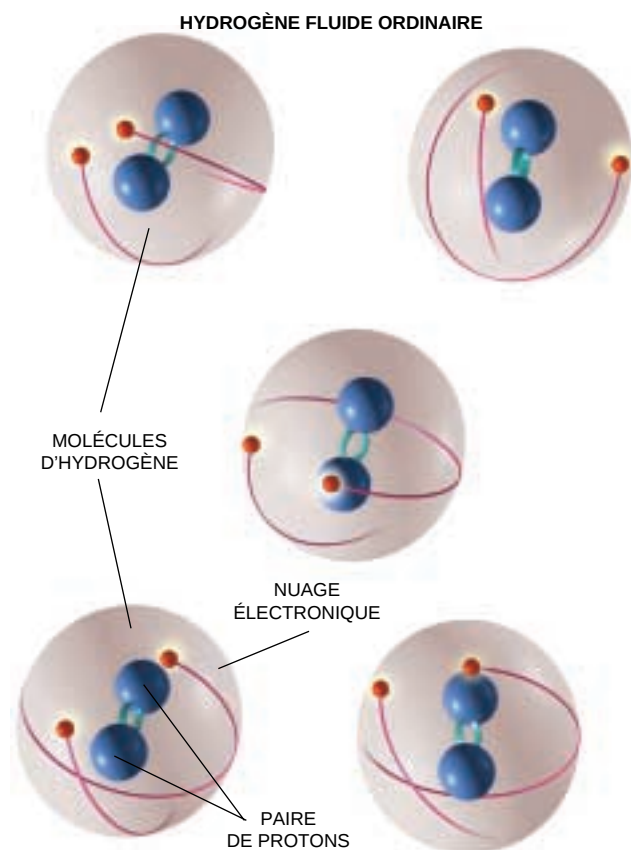
3. LE CANON À GAZ est constitué d'une culasse et d'un tube qui se prolonge par un cylindre plus étroit. Avant la mise à feu, la culasse contient 3,3 kilogrammes de poudre à canon (*en haut*). Quand la poudre s'enflamme, les gaz brûlants issus de l'explosion poussent un pis-

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-

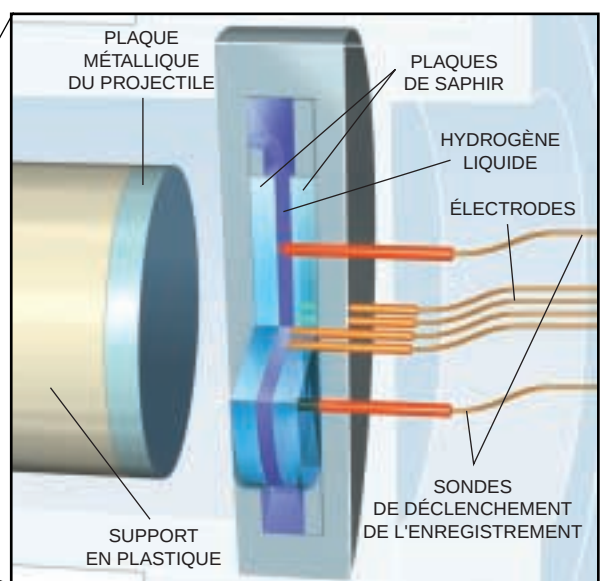
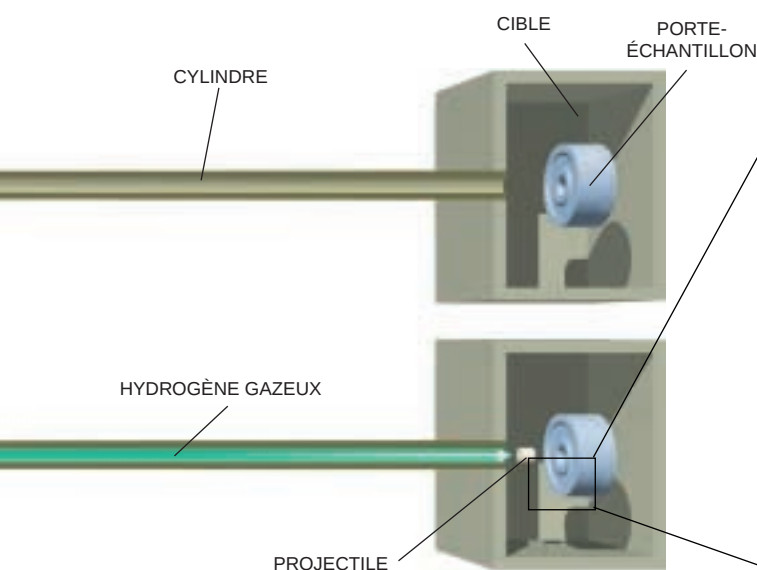
quait qu'il était devenu métallique. Au-delà (jusqu'à 180 gigapascals), elle n'a plus baissé.

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.