

géologiques : soit les émissions d'hydrogène étaient localisées au fond des océans, sur les sites hydrothermaux des rides médio-océaniques (sous des milliers de mètres d'eau et dans des contextes très hostiles et corrosifs, voir la figure ci-contre), soit leurs flux étaient trop faibles pour que l'on imagine un intérêt industriel.

Des travaux récents, encore modestes, montrent que la Terre produit et émet des quantités d'hydrogène bien plus importantes qu'on ne le pensait, et ce dans des lieux très accessibles sur les principaux continents. Sur le plan géologique, on peut décrire deux grands types de gisements : ceux des formations ophiolitiques (lambeaux de lithosphère océanique coincés dans des chaînes de montagnes, dans des zones de subduction, là où une plaque lithosphérique plonge sous une autre), et ceux situés dans des zones cratoniques, c'est-à-dire au cœur des continents anciens.

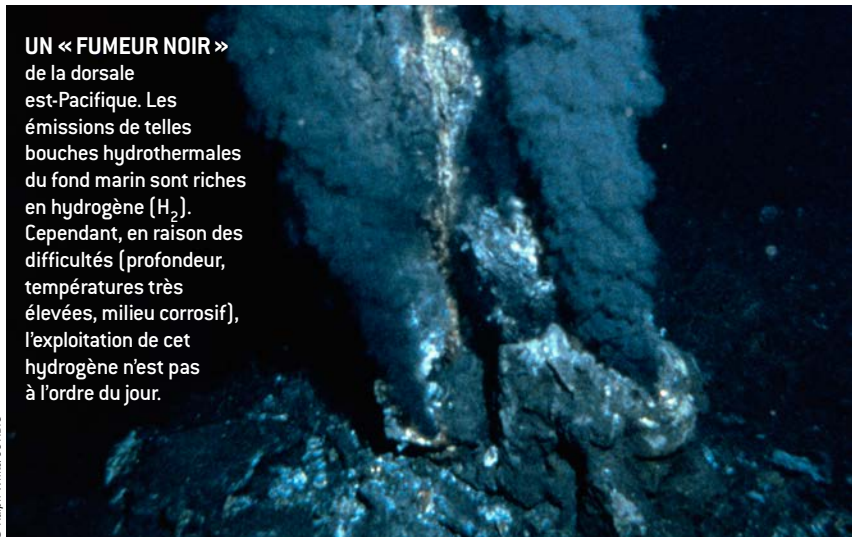
L'hydrogène émis sur les rides médio-océaniques et dans les formations ophiolitiques a déjà été beaucoup étudié, et les mécanismes de sa genèse sont assez bien cernés. En revanche, la connaissance et l'exploration de l'hydrogène continental, dont les quantités et les flux semblent plus importants, restent très préliminaires.

On peut comparer cette situation avec celle du pétrole, utilisé industriellement depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, alors que les premiers travaux scientifiques cohérents sur l'origine du pétrole ne datent que des années 1930. Il n'est donc pas déraisonnable d'imaginer que l'humanité sera capable de récupérer et d'utiliser l'hydrogène naturel même si les mécanismes de sa genèse et de sa migration dans le sous-sol sont encore mal compris.

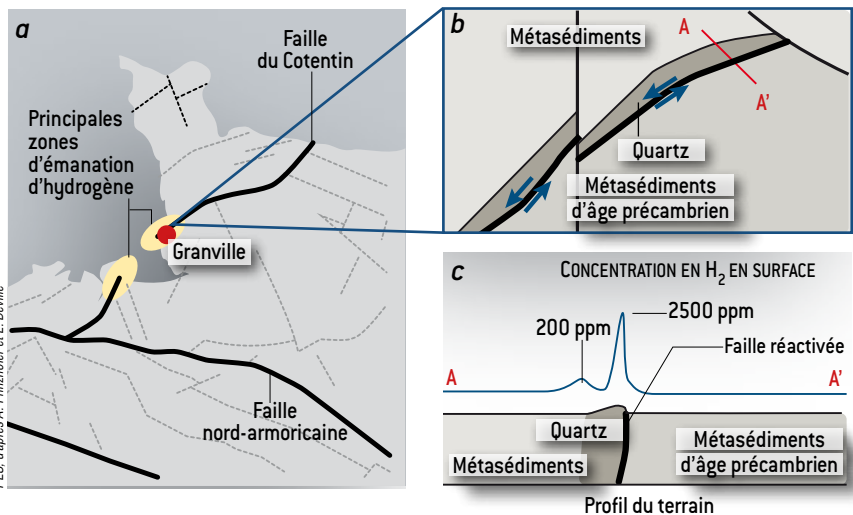
## Une origine géologique encore mal identifiée

L'hydrogène océanique et ophiolitique a été étudié par le monde académique pour deux raisons. D'une part, il s'agit de comprendre les processus géochimiques dont il est issu et qui font partie du fonctionnement de la Terre, vue comme un grand réacteur chimique animé de mouvements de convection (remontées par poussée d'Archimède de matière chaude, plongées de matière froide). D'autre part, cet hydrogène est considéré comme l'une des briques essentielles à l'origine et à l'évolution initiale de la vie sur Terre. En effet, on

**UN « FUMEUR NOIR »**  
de la dorsale est-Pacifique. Les émissions de telles bouches hydrothermales du fond marin sont riches en hydrogène (H<sub>2</sub>). Cependant, en raison des difficultés (profondeur, températures très élevées, milieu corrosif), l'exploitation de cet hydrogène n'est pas à l'ordre du jour.

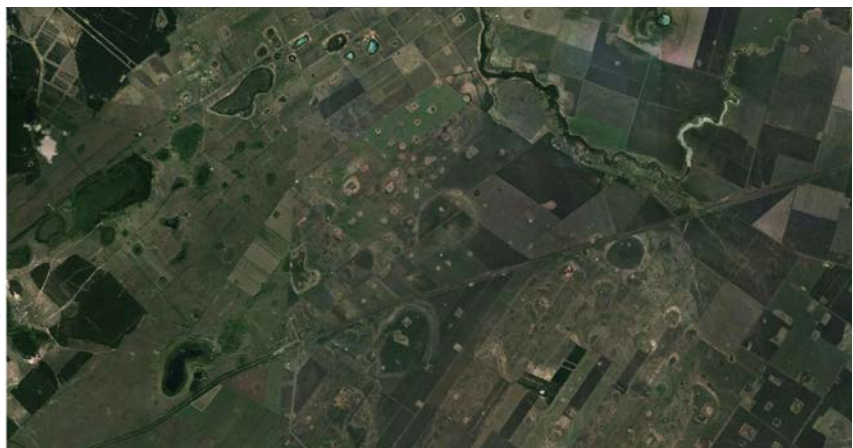


© Ralph White/CO2RIS



**DES ÉMISSIONS D'HYDROGÈNE**, liées à des failles, ont été repérées dans le nord-ouest de la France (a). L'étude de la faille de Granville (b et c, selon la direction AA') a montré que celle-ci, cimentée par un filon de quartz épais d'environ 50 mètres, laisse fuir de l'hydrogène aux bordures du filon. Les flux les plus importants sont associés à la bordure sud-est, probablement en raison d'une fracturation plus intense du quartz au contact des métasédiments d'âge précambrien.

© Google Earth/2015 Digital Globe ; © 2015 CNES/Astrum ; 2015 ONES/SpotImage



**UNE VUE SATELLITAIRE DE LA RÉGION DE BORISSOGLEBSK**, en Russie, à environ 600 kilomètres au sud de Moscou. On distingue de nombreuses dépressions circulaires qui correspondent à des centres d'émission d'hydrogène naturel.

sait aujourd'hui qu'avant l'apparition de la photosynthèse (et donc l'utilisation de l'énergie solaire par les organismes biologiques), l'unique source d'énergie accessible aux êtres vivants était l'hydrogène.

Quelle est l'origine de l'hydrogène océanique et ophiolitique ? L'explication privilégiée aujourd'hui par les scientifiques est l'altération des principales roches dont est constituée la lithosphère océanique, les péridotites. Le minéral majoritaire de ces roches est l'olivine, qui contient du

fer ferreux (des ions  $\text{Fe}^{2+}$ ). Or l'olivine s'altère facilement par interaction avec de l'eau chaude, due à l'hydrothermalisme des rides médio-océaniques ou juste à l'augmentation de température avec la profondeur.

Le fer ferreux est alors solubilisé dans l'eau, et une réaction d'oxydo-réduction se produit : le fer ferreux s'oxyde en fer ferrique ( $\text{Fe}^{3+}$ ), tandis que l'eau se réduit en hydrogène moléculaire,  $\text{H}_2$ . Cette réaction bien connue (réaction dite de serpentinisation) peut avoir lieu par voie chimique si les températures le permettent, ou par voie biologique dans les formations plus superficielles, donc plus froides.

L'origine de l'hydrogène découvert en milieu continental est en revanche encore

mal identifiée et fait l'objet de plusieurs hypothèses en concurrence. Quoi qu'il en soit, les roches associées sont soit des formations sédimentaires, soit des formations plutoniques (granites ou gneiss). Et le premier guide de prospection est la présence de dépressions circulaires, de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres de diamètre, profondes de quelques dizaines de centimètres, voire quelques mètres, qui peuvent apparaître en moins de deux ans seulement (voir les figures pages 39 et 42).

Ces dépressions pourraient être dues à la perte d'eau, transformée en hydrogène qui s'échappe du sous-sol (voir plus bas), ce qui provoque un effondrement de terrain. Au sein de telles dépressions, on a pu mesurer des flux importants d'hydrogène : plusieurs dizaines de milliers de mètres cubes par jour et par structure (alors qu'à l'extérieur de ces structures, aucun flux n'est mis en évidence).

Pour expliquer l'émission d'hydrogène naturel, Nikolay Larin, de l'institut Schmidt de physique de la Terre à Moscou, et ses collègues avancent que l'hydrogène serait profond, primordial, piégé dans des hydrures métalliques (structures cristallines combinant des atomes d'hydrogène et de métal) au sein du noyau terrestre ; cet hydrogène se libérerait peu à peu et migrerait jusqu'à la surface au cours des temps

**Des dépressions circulaires associées à des émissions d'hydrogène peuvent se créer en moins de deux ans.**

## Des émanations d'hydrogène un peu partout sur les continents

**A**u cours des dernières décennies, plusieurs découvertes sporadiques de sites d'émission de gaz riche en hydrogène ont eu lieu, par exemple dans l'est du Kansas dans les années 1970, dans la péninsule de Kola au nord-ouest de la Russie et dans le cratère d'impact météoritique de Siljan, en Suède, dans les années 1980.

Des découvertes ont aussi eu lieu dans des mines de charbon en Afrique du Sud et au centre du Mali (gisement qui alimente depuis deux ans un petit générateur d'électricité et qui fait par ailleurs l'objet d'un projet d'exploitation), etc.

Mais la mise en évidence de flux importants d'hydrogène s'échappant de la croûte continentale aura lieu bien plus tard, en Russie. En 2005, le géologue russe Nikolay Larin et son père

Vladimir découvrent que de l'hydrogène émane d'une dépression à peu près circulaire située dans le craton (partie très ancienne et stable de la croûte continentale) européen.

Depuis, quelques dizaines de dépressions similaires, dont il existe plusieurs milliers entre la région de Moscou et le Kazakhstan, ont été étudiées par Nikolay Larin et ses collègues, avec à chaque fois des émissions d'hydrogène en

quantité significative. Après les premières découvertes de l'équipe russe, avec laquelle nous avons commencé à collaborer en 2010, nous avons entrepris de repérer, à l'aide des images de GoogleEarth, d'autres dépressions analogues dans le monde, afin d'étudier leurs flux d'hydrogène.

C'est ainsi que, avec Kathleen Farrell, du Service géologique de la Caroline du Nord, nous avons étudié quelques-unes des innombrables dépressions elliptiques de la région dite des Carolinas Bays, avec des résultats similaires à ceux de l'étude des dépressions russes.

Bien d'autres endroits dans le monde présentent des dépressions de même

morphologie. Il reste à les étudier pour déterminer lesquelles sont associées à des émissions d'hydrogène et lesquelles relèvent d'autres phénomènes géologiques (dolines formées par la dissolution de calcaires ou d'évaporites peu profonds, effondrements dus à la fonte d'une lentille de glace dans un pergélisol, etc.).

Enfin, il faut souligner que les émissions d'hydrogène ne concernent pas que des dépressions circulaires : on peut les trouver dans les fractures de roches de surface très durcies, comme en témoignent les sites d'émission au Kansas ou ceux récemment mis en évidence dans l'ouest de la France.

— A. P. et É. D.