

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 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 (Fe^{3+}), tandis que l'eau se réduit en hydrogène moléculaire, 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

Au 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.

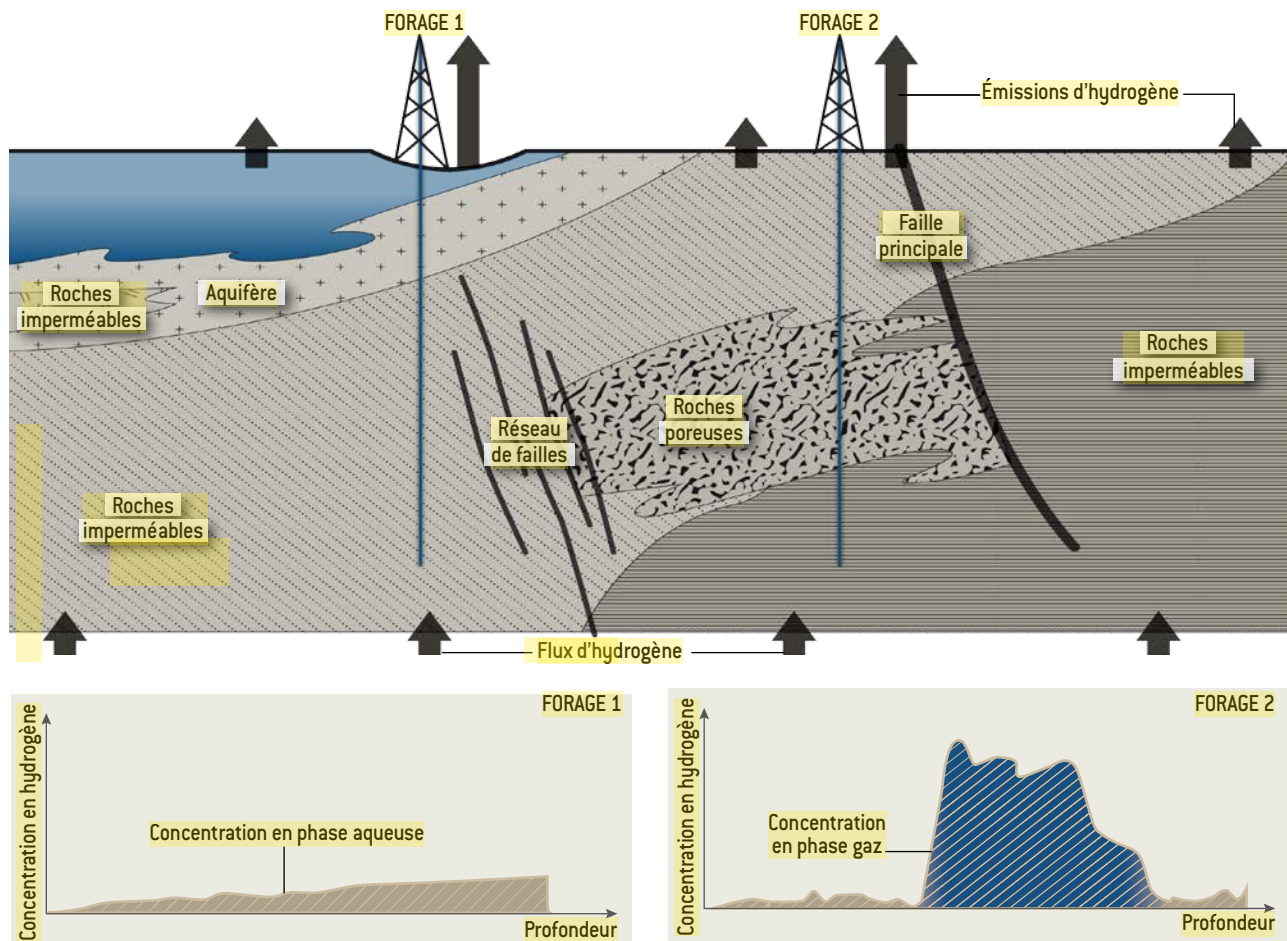
C'est ainsi que, avec Kathleen Farrell, du Service géologique de la Caroline du Nord, nous avons étudié quelques-unes des innombrables dépressions elliptiques de la région dite des Carolinas Bays, avec des résultats similaires à ceux de l'étude des dépressions russes.

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.



SCHÉMATISATION D'UNE ZONE GÉOLOGIQUE où un flux profond d'hydrogène s'achemine vers la surface, avec deux cas de figure distincts. Dans le cas du forage 1, l'hydrogène reste en solution dans l'eau des aquifères, migre uniquement par diffusion en milieu aqueux, avec des concentrations qui diminuent dans les zones plus superficielles et restent toujours modestes. Dans le cas du forage 2, un contraste

suffisant d'imperméabilité permet à l'hydrogène de se concentrer et de se désorber de l'eau qui le contient, formant des bulles de gaz qui remontent par poussée d'Archimède et conduisent à une accumulation transitoire d'hydrogène, *a priori* facile à exploiter. Le forage 1 serait caractéristique du Kansas, tandis que le forage 2 représenterait ce que l'on croit savoir des accumulations présentes au Mali.

géologiques. Cette hypothèse est problématique, étant donné la longue remontée de l'hydrogène à travers les roches (des oxydes) du manteau terrestre. Il nous est difficile d'imaginer que les molécules H_2 , très réactives, parviendraient jusqu'à la surface sans s'être chimiquement liées à d'autres éléments ou composés.

Plusieurs hypothèses

Une autre explication invoque la radiolyse de l'eau, c'est-à-dire la décomposition des molécules d'eau sous l'effet de la radioactivité naturelle, due à l'uranium en particulier. Ce phénomène a été mis en évidence, par exemple, dans des formations géologiques du Gabon datant de deux milliards d'années, et il est bien documenté. Cependant, il nous semble qu'aujourd'hui, les teneurs résiduelles des roches en uranium radioactif ne contribueraient que marginalement à la production d'hydrogène.

L'hypothèse que nous privilégions pour la genèse de l'hydrogène continental n'est

pas très éloignée de l'interprétation de l'hydrogène océanique : il s'agirait d'une réduction de l'eau par un métal susceptible de s'oxyder. L'élément chimique le plus abondant pouvant convenir est le fer, car il a plusieurs degrés possibles d'oxydation : comme on l'a vu plus haut, entre la forme métallique, qui n'existe à l'état naturel sur Terre qu'au sein du noyau de la planète et dans les rares météorites de fer, et le fer ferrique, ou Fe^{3+} , bien connu sous forme de « rouille », il existe une troisième forme intermédiaire d'oxydation du fer, le fer ferreux, ou Fe^{2+} . La déstabilisation d'un minéral contenant du fer ferreux rend possible une réaction où l'eau se réduit en H_2 tandis que le fer devient ferrique.

Il reste à trouver, dans la croûte continentale, des minéraux contenant du fer ferreux et qui peuvent, par enfouissement, donc sous l'effet de l'augmentation de température et de pression, se déstabiliser et libérer du fer ferreux dans les eaux souterraines. L'un de ces minéraux vient d'être étudié par Vincent Milesi, de l'Institut de physique

du globe de Paris, et ses collaborateurs. Il s'agit d'un minéral à base de carbonate de fer ($FeCO_3$) nommé sidérite. Il se déstabilise à relativement basse température (vers 200 °C), et il ne contient que du fer ferreux, qui peut alors réduire l'eau pour produire de l'hydrogène (selon la réaction $3FeCO_3 + H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 3CO_2 + H_2$). Cependant, bien d'autres minéraux sont envisageables, même si les études expérimentales restent à faire : chlorites ferreuses, pyroxènes, amphiboles, micas, etc.

L'hydrogène continental a été découvert à ce jour dans presque tous les continents : en Russie, aux États-Unis (au Kansas et en Caroline du Nord, où des structures circulaires émettent également de l'hydrogène, voir la figure pages 36-37), au Brésil, au Mali, et même dans l'ouest de la France (voir la figure page 39). Mais pour l'instant, seuls deux endroits au monde (au Mali et au Kansas américain) ont fait l'objet de forages en vue de récupérer ce gaz.

Les autres localités ont surtout été soumises à des études géochimiques