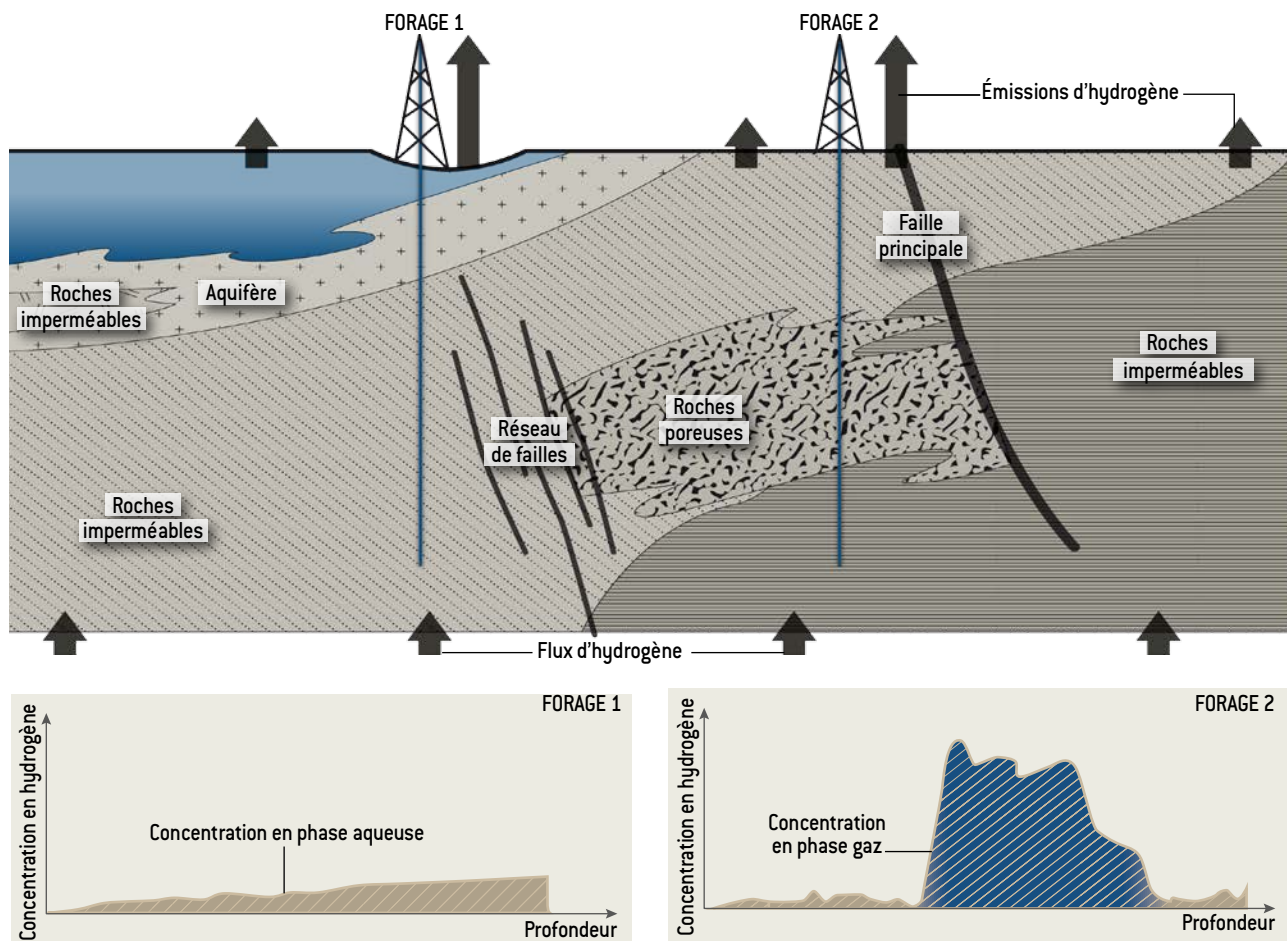




SCHÉMATISATION D'UNE ZONE GÉOLOGIQUE où un flux profond d'hydrogène s'achemine vers la surface, avec deux cas de figure distincts. Dans le cas du forage 1, l'hydrogène reste en solution dans l'eau des aquifères, migre uniquement par diffusion en milieu aqueux, avec des concentrations qui diminuent dans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



DES DÉPRESSIONS associées à des émissions d'hydrogène peuvent se former en peu de temps. En témoignent ces images du site d'Elektrostal, à l'est de Moscou, prises par satellite. En 2002, aucune structure ne peut être détectée dans le couvert végétal [forêt]. En 2004, une structure circulaire d'environ 180 mètres de diamètre apparaît, avec la mort concomitante des arbres situés dans ce cercle. Des émanations d'hydrogène y ont été mesurées.

■ BIBLIOGRAPHIE

A. Prinzhofer et É. Deville, *Hydrogène naturel - La prochaine révolution énergétique ?*, Belin, 2015.

É. Deville et A. Prinzhofer, *L'hydrogène naturel : une source potentielle d'énergie propre et renouvelable*, *Géologues*, n° 185, pp. 105-110, 2015.

V. Milesi et al., *Formation of CO₂, H₂ and condensed carbon from siderite dissolution in the 200-300 °C range and at 50 Mpa*, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 154, pp. 201-211, 2015.

N. Larin et al., *Natural molecular hydrogen seepage associated with surficial, rounded depressions on the European craton in Russia*, *Natural Resources Research*, publié en ligne le 15 novembre 2014.

de surface : mesures de concentrations d'hydrogène dans les sols à environ un mètre de profondeur, afin de déterminer des flux d'émission dans l'atmosphère. Il faut bien avoir à l'esprit que ce gaz, très réactif et très mobile, ne peut être étudié et compris de la même manière que le méthane. Il ne s'agit pas d'un gaz fossile, accumulé pendant les temps géologiques qui se comptent en millions d'années, mais d'un gaz produit avec le même flux que celui de son émission dans l'atmosphère. Les flux d'émission mesurés par ces campagnes de géochimie de surface représentent donc les flux que l'on espère récupérer lors d'une future exploitation, et ce de façon durable, sans épuiser un quelconque gisement.

Des accumulations possibles

Est-ce à dire qu'il n'existe pas d'accumulations d'hydrogène gazeux ? L'exemple du Mali, où une telle accumulation a été découverte par hasard dans les années 1970, à l'occasion d'un forage à eau, montre qu'elles existent, et que l'on en trouvera sans doute ailleurs. Toute accumulation dans le sous-sol, de pétrole, de méthane ou d'hydrogène (voir la figure page 41), est une accumulation transitoire, comme un embouteillage sur une autoroute : la diminution de la vitesse de chaque élément (molécules ou voitures) entraîne une densification de ces éléments à l'endroit du ralentissement (donc une accumulation), mais le flux se poursuit malgré tout, et les voitures finissent par arriver à leur destination, comme les molécules de gaz finissent par se disperser dans l'atmosphère.

Ce qui compte est le temps caractéristique de l'accumulation – quelques heures pour un embouteillage, des millions d'années pour les hydrocarbures, et sans doute quelques années ou décennies pour l'hydrogène naturel. À l'échelle humaine, on parle donc d'énergies fossiles pour les hydrocarbures, d'énergie de flux pour l'hydrogène, mais chacune de ces expressions est une simplification correspondant à une échelle de temps différente.

Où peut-on espérer trouver des émissions d'hydrogène continental ? Nous avons constaté que la proximité de grandes failles profondes, anciennes mais pouvant rejouer récemment, est un guide très performant. Dans l'ouest de la France, où l'on ne peut espérer détecter des dépressions circulaires en raison de la forte présence d'activités humaines, nous avons ainsi mesuré en mai 2015 des flux d'hydrogène naturel du même ordre qu'au sein des dépressions, le long de grandes failles du domaine nord-armoricain, près de Granville et de la pointe du Grouin (voir la figure page 39). Dans d'autres régions où les dépressions circulaires restent visibles (terrain meuble et absence d'activités humaines ou de forêt), on observe que ces structures s'alignent, à l'échelle d'un continent, sur les grands accidents tectoniques déjà cartographiés.

Récapitulons les trois types de sources d'hydrogène naturel. Il y a d'abord les fonds océaniques, dont l'intérêt industriel reste lointain. Viennent ensuite les sources associées aux ophiolites. Bien qu'elles soient beaucoup plus accessibles que les fonds marins, leurs flux sont modestes et liés à des formations rocheuses peu aisées à exploiter (zones montagneuses, roches imperméables

et dépourvues de porosité ne permettant pas au gaz de s'accumuler temporairement). Les sources situées au cœur des vieux continents, enfin, sont les plus prometteuses : leurs flux sont les plus intenses, leur accessibilité est optimale et, qui plus est, on sait que dans les rares cas étudiés par forage, il existe des accumulations transitoires pouvant être exploitées sans que l'on ait à récupérer les flux en surface, opération techniquement plus délicate.

Des études nécessaires

Ainsi, nous savons maintenant que l'hydrogène existe dans la nature en quantités suffisantes pour envisager une production de ce qui représentera une nouvelle source d'énergie. Nous avons pu définir, en particulier en milieu intracontinental, quelques guides de prospection : les dépressions circulaires, les grandes failles. Mais de nombreuses questions demeurent. Comment récupérer efficacement cet hydrogène ? Comment en repérer des accumulations, plus facilement exploitables ? Quels sont ses flux, de manière plus quantitative ? Quels

De l'hélium aussi

L'hélium, gaz qui s'est révélé être présent en quantités exploitables pour la première fois en 1903 (avec le forage de Dexter au Kansas), constitue aujourd'hui un marché important et stratégique, principalement en lien avec l'électronique. Or les rares gisements d'hydrogène naturel étudiés en milieu continental présentent des concentrations d'hélium supérieures à celles de la plupart des gisements de méthane, l'unique source de l'hélium produit aujourd'hui. Les concentrations associées à l'hydrogène continental sont d'environ 1 à 2 %, soit trois à six fois supérieures au seuil à partir duquel une exploitation industrielle est rentable. L'hélium contribuerait donc aussi à valoriser l'exploitation de l'hydrogène naturel.

sont les meilleurs moyens de prospection ? Les flux de surface pourront-ils alimenter une production industrielle d'hydrogène ?

Toutes ces questions sont ouvertes aujourd'hui, et seuls des efforts pluridisciplinaires de recherche et développement permettront d'y répondre assez précisément – même si certains sites pilotes, au Kansas et au Mali, sont déjà en état de produire des petites quantités d'hydrogène.

On l'a vu, l'exploitation de l'hydrogène naturel présenterait de nombreux avantages environnementaux. Mais cette perspective pourrait se heurter à des obstacles tels que des lobbies industriels présents sur d'autres niches du marché énergétique, ou les changements d'organisation de nos sociétés que cette énergie décentralisable nécessiterait. L'humanité aura-t-elle le désir d'explorer plus avant le potentiel de l'hydrogène naturel afin de déterminer si les promesses d'aujourd'hui peuvent devenir réalité ou si cette source d'énergie ne pourra être que marginale ? Ce n'est qu'en investissant et en travaillant sur ce sujet que nous saurons si l'hydrogène naturel fera ou non partie de l'aventure humaine. ■



Dans l'inter france **êt de la science**

mathieu vidard | **la tête au carré**
14:05-15:00

inter france **venez**
franceinter.fr