



De l'hydrogène naturel sous nos pieds

Les géologues ont découvert en plusieurs sites continentaux de par le monde des émissions d'hydrogène en quantités importantes. Une prochaine révolution énergétique se profile-t-elle ?

Alain Prinzhofer et Éric Deville

Il y a un peu plus de deux ans, un communiqué de presse de l'IFPEN (Institut français du pétrole et des énergies nouvelles) provoquait un minidérèglement médiatique dans le monde de la vulgarisation scientifique : on y apprenait que de l'hydrogène est émis non seulement au fond des océans – on le savait depuis les années 1970 par les travaux de l'Ifremer – et dans certaines chaînes de montagnes, mais aussi en plein milieu des continents. En outre, on avait déjà trouvé des gisements de ce gaz combustible, sans les avoir cherchés. En trouver d'autres, cette fois en les cherchant, semblait donc un pari prometteur. De fait, nos

recherches effectuées en collaboration avec une équipe russe suggèrent que les sites où de l'hydrogène s'échappe du sol sont très nombreux sur les continents.

De l'hydrogène gazeux présent sur Terre en abondance, sans avoir à le fabriquer ? Si tel est bien le cas, le secteur de l'énergie pourrait être bouleversé. Ce n'est pas tous les jours qu'une nouvelle source d'énergie se révèle, et une telle découverte embarrasse les décideurs. En effet, lancer de grands programmes de recherche et développement sur un sujet pionnier, comme l'est celui de l'hydrogène naturel, est risqué : le succès pourrait ne pas être au rendez-vous (mais si on

Géosciences [37

L'ESSENTIEL

- L'hydrogène utilisé aujourd'hui est produit à partir d'hydrocarbures ou par électrolyse de l'eau, et ne constitue donc pas une source d'énergie.
- Des émissions naturelles d'hydrogène ont été découvertes récemment dans plusieurs régions continentales.
- De tels sites d'émission, où le flux d'hydrogène est important, semblent nombreux.
- Des études sont nécessaires pour évaluer la possibilité d'exploiter industriellement cet hydrogène naturel, qui pourrait constituer une source d'énergie.

Page précédente: © istock.org

LES AUTEURS



Alain PRINZHOFER est directeur scientifique de la société GEO4U, au Brésil, et professeur associé à l'Institut de physique du globe de Paris et au Laboratoire interdisciplinaire des énergies de demain, à Paris.

Éric DEVILLE est géologue à l'IFPEN (Institut français du pétrole et des énergies nouvelles) et professeur à IFP School, à Rueil-Malmaison.

connaissait, avant de lancer un programme de recherche, son résultat final, la recherche n'existerait plus...).

Par ailleurs, après bientôt deux siècles de dépendance vis-à-vis des énergies fossiles (charbon et pétrole), envisager de nouvelles structures techniques et sociétales pour y intégrer l'hydrogène naturel est un défi. Il est plus aisé d'exploiter de vieilles sources d'énergie (le soleil, le vent) avec des technologies d'aujourd'hui (panneaux photovoltaïques, éoliennes)...

L'hydrogène qui nous occupe ici se réfère au composé gazeux H_2 , plus proprement nommé dihydrogène, et dont les molécules sont l'association de deux atomes d'hydrogène au sens strict, l'élément le plus abondant de l'Univers. La découverte de gisements d'hydrogène laisse-t-elle espérer un meilleur avenir énergétique pour l'humanité? Nous allons tenter de faire le point sur cette question, mais il faut bien garder à l'esprit que si l'on n'entreprend pas de recherches pour approfondir nos connaissances, l'hydrogène n'a aucune chance de devenir une source significative d'énergie.

Précisons pour commencer que le marché industriel de l'hydrogène est aujourd'hui bien plus important qu'on ne l'imagine: son chiffre d'affaires dépasse les 100 milliards de dollars par an dans le monde. Le volume d'hydrogène que nous consommons, principalement dans les raffineries et dans l'industrie de l'ammoniac, correspond à environ 22 % de la consommation de «gaz naturel» (terme qui désigne, de façon simplifiée et abusive, le méthane extrait du sous-sol).

Cependant, cet hydrogène est en totalité fabriqué par l'homme, et ce à 94 % à partir d'énergies fossiles (méthane, pétrole, charbon), le reste par hydrolyse. Son coût est très élevé, tant sur le plan financier que sur le plan environnemental: à énergie égale, il coûte environ cinq fois plus que le pétrole, et pour un kilogramme d'hydrogène fabriqué, on libère dix kilogrammes de dioxyde de carbone (CO_2). De plus, le rendement énergétique de sa production est inférieur à celui de la combustion directe des ressources hydrocarbonées fossiles servant à le fabriquer.

Par conséquent, aujourd'hui, rouler à l'hydrogène signifie polluer et consommer davantage que lorsqu'on roule aux carburants classiques, hydrocarbonés. C'est pourquoi l'emploi de l'hydrogène comme carburant reste depuis des décennies un

rêve peu développé, même si Toyota vient de lancer le premier modèle industriel de voiture à hydrogène (la *Mirai*).

Cette situation pourrait changer dans un proche avenir, pour deux raisons. D'une part, l'augmentation de la part des énergies renouvelables (photovoltaïque, éolienne) exige un stockage de l'électricité produite, ces sources d'énergie étant intermittentes. Or on ne sait pas stocker de grandes quantités d'électricité. En revanche, on peut facilement transformer l'électricité en hydrogène, grâce à l'électrolyse; et la transformation inverse, d'hydrogène en électricité, se fait aussi sans problème majeur avec des piles à combustible (inventées en 1842!). On envisage donc d'utiliser l'équivalence électricité-hydrogène pour suivre la demande énergétique avec la même souplesse qu'avec les énergies fossiles «de stock», sans souffrir du bon vouloir du soleil ou du vent.

D'autre part, on peut maintenant considérer l'hydrogène non simplement comme un vecteur d'énergie (une forme utilisable d'énergie produite par l'homme à partir d'une autre source), mais aussi comme une source d'énergie, produite directement par la nature. C'est tout l'enjeu de l'hydrogène naturel qui est, comme nous le verrons, produit par la Terre en quantités importantes et dans de nombreux endroits.

Des gisements qui semblent bien répartis

Cette nouvelle source d'énergie pourrait changer les structures de nos sociétés, fondées depuis les révolutions industrielles sur les énergies fossiles de stock. L'exploitation du pétrole, des hydrocarbures gazeux ou du charbon a un caractère centralisé, l'extraction de ces ressources n'étant possible qu'en un nombre limité de lieux inégalement répartis à la surface du globe. Au contraire, l'hydrogène naturel semble réparti à peu près partout, son exploitation telle qu'on l'imagine aujourd'hui pourrait se faire avec des forages peu profonds (plus proches des forages à eau que des forages pétroliers), et l'on peut envisager son utilisation sans avoir à le raffiner. Rappelons aussi que la consommation d'hydrogène n'est pas polluante, puisque sa combustion (la réaction $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$) ne produit que de l'eau.

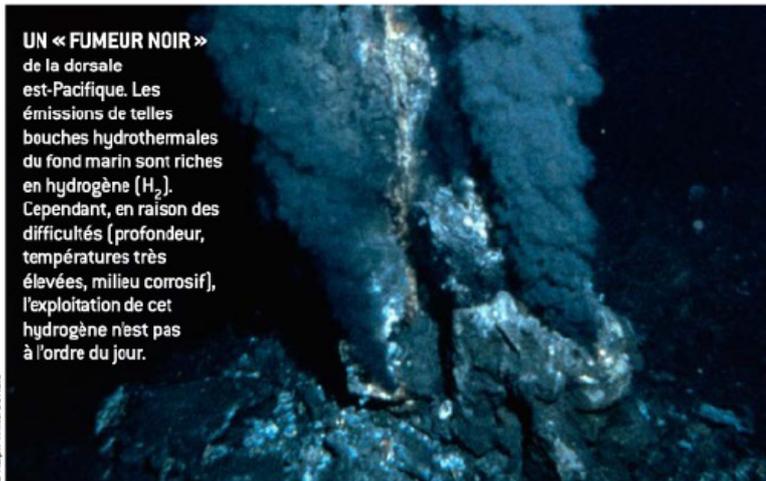
Que sait-on de l'hydrogène naturel? Des émissions d'origine souterraine de ce gaz sont avérées depuis les années 1970 au moins. Mais il s'agissait de curiosités

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.

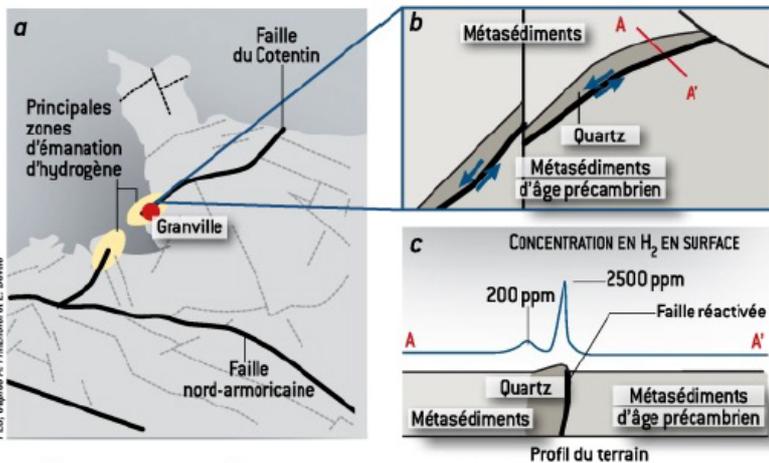
L'hydrogène émis sur les rides médio-océaniques et dans les formations ophiolitiques a déjà été beaucoup étudié, et les mécanismes de sa genèse sont assez bien cernés. En revanche, la connaissance et l'exploration de l'hydrogène continental, dont les quantités et les flux semblent plus importants, restent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

On peut comparer cette situation avec celle du pétrole, utilisé industriellement depuis le milieu du XIX^e 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.



UN « FUMEUR NOIR » de la dorsale est-Pacifique. Les émissions de telles bouches hydrothermales du fond marin sont riches en hydrogène (H₂). Cependant, en raison des difficultés [profondeur, températures très élevées, milieu corrosif], l'exploitation de cet hydrogène n'est pas à l'ordre du jour.

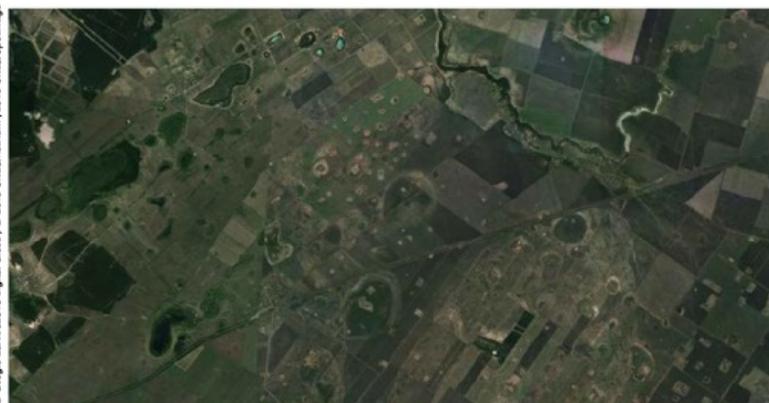
© Rajon White/CONRS



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.

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



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 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.

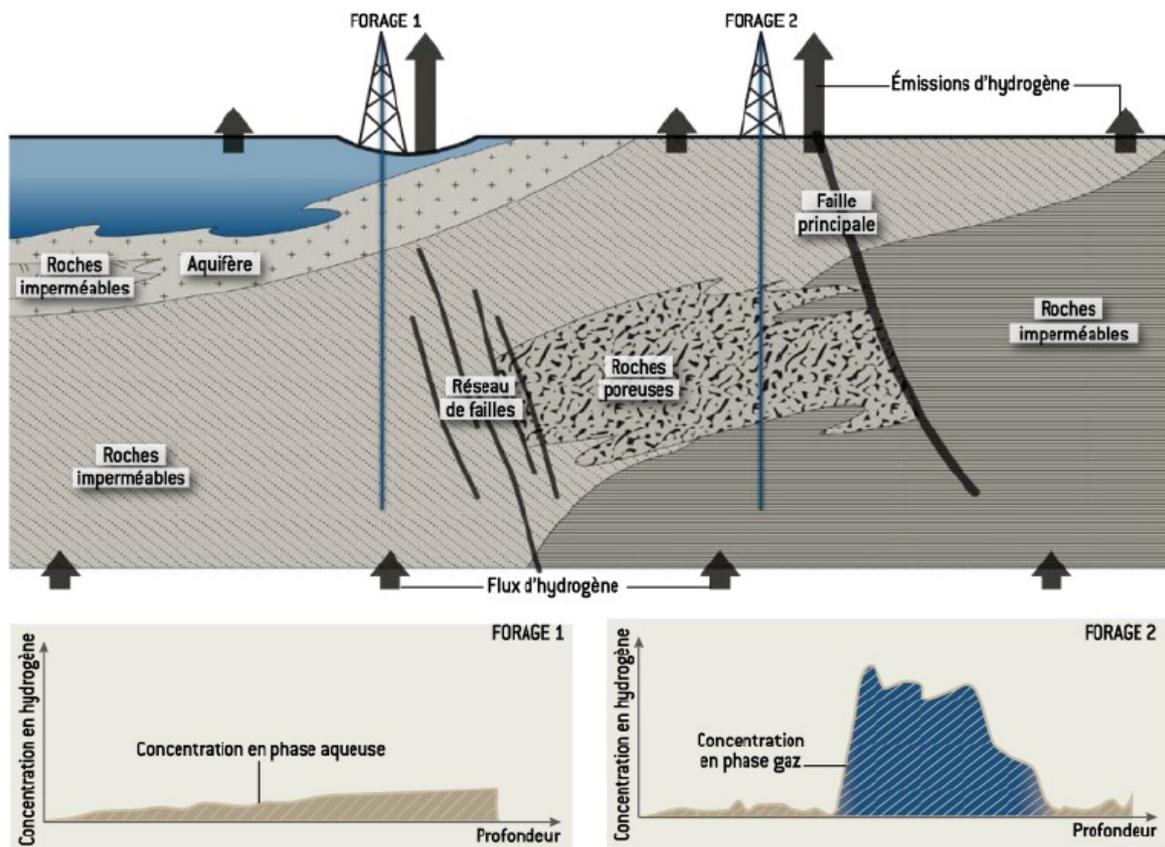
C'est ainsi que, avec Kathleen Farrell, du Service géologique de la Caroline du Nord, nous avons étudié quelques-unes des innombrables dépressions elliptiques de la région dite des Carolina Bays, avec des résultats similaires à ceux de l'étude des dépressions russes.

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



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.

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.

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

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.

■ 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.

et dépourvues de porosité ne permettant pas au gaz des 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. ■