

### L'hydrogène naturel, une nouvelle source d'énergie renouvelable

**Résumé** L'hydrogène naturel, sous sa forme moléculaire  $H_2$ , est abondant dans le milieu géologique – telle est la conclusion d'une synthèse récente. Ce gaz est généré en permanence dans les profondeurs de la Terre par des réactions inorganiques, ce qui permet de le classer comme une ressource renouvelable. Les estimations de flux d'hydrogène naturel ont été revues à la hausse, ce qui ouvre la possibilité d'exploration de cette nouvelle ressource.

**Mots-clés** Hydrogène naturel, énergie, renouvelable, économie.

**Abstract** Natural hydrogen, a new source of renewable energy

Natural hydrogen in its molecular form  $H_2$  is abundant in geological environment – this is the conclusion of a recent review. This gas is permanently generated in the depths of the Earth by inorganic reactions, which allows it to be classified as a renewable resource. Estimates of natural hydrogen flux have been revised upwards, which opens up the possibility of exploration of this new resource.

**Keywords** Natural hydrogen, energy, renewable, economy.

Une synthèse de la littérature scientifique autour du sujet de l'hydrogène naturel a été récemment publiée dans le journal *Earth-Science Reviews* [1]. Elle combine des données et des idées de près de cinq cents publications et livres scientifiques, et montre de manière concluante que l'hydrogène est beaucoup plus abondant dans la nature qu'on ne le pensait auparavant. Il s'agit de l'hydrogène dans son état moléculaire, ou dihydrogène ( $H_2$ ), et non de l'hydrogène lié de façon covalente sous forme d'eau ou dans les composés organiques<sup>(1)</sup>. La Terre est recouverte d'océans et de matières organiques qui contiennent de l'hydrogène, mais pendant longtemps, il a été considéré que le dihydrogène ne pouvait pas être présent sur Terre en grandes quantités. Les découvertes périodiques de dihydrogène étaient considérées comme des erreurs d'échantillonnage, ou comme des curiosités géologiques.

Sans le savoir, les humains ont rencontré depuis l'Antiquité des gaz riches en hydrogène, tels les mofettes (échappements naturels) de gaz qui brûlent en continu à Chimère, près d'Antalya en Turquie (figure). Ce gaz contient de 7,5 à 11,3 % de  $H_2$  et ses événements actifs sont connus depuis plus de 2 500 ans. La légende dit qu'à cet endroit se trouvait la source de la première flamme olympique. C'est aussi le lieu où les anciens Grecs situaient l'ancre de la Chimère, ce monstre mythique vaincu par le héros Bellérophon monté sur le cheval ailé Pégase.

La première analyse publiée d'un échantillon de gaz naturel contenant de l'hydrogène a été effectuée en 1888 par D. Mendeleïev. Il a signalé 5,8 à 7,5 % d'hydrogène dans le gaz s'échappant des fractures du charbon d'une mine près de la ville de Makiïvka, dans la région de Donetsk en Ukraine. Dans le siècle qui va suivre, c'est dans cette partie du globe – en Europe de l'Est et en Asie du Nord – que la majorité des découvertes d'hydrogène naturel sera faite. Mais ce n'est pas parce que cette région du monde est plus riche en hydrogène, mais simplement parce que historiquement l'hydrogène naturel y a été étudié plus souvent.

Cet exemple montre clairement une erreur de raisonnement logique. Si personne ne s'attend à trouver de l'hydrogène libre, personne n'en cherche. Ce préjugé influence la façon dont les échantillons de gaz sont analysés, mais surtout la

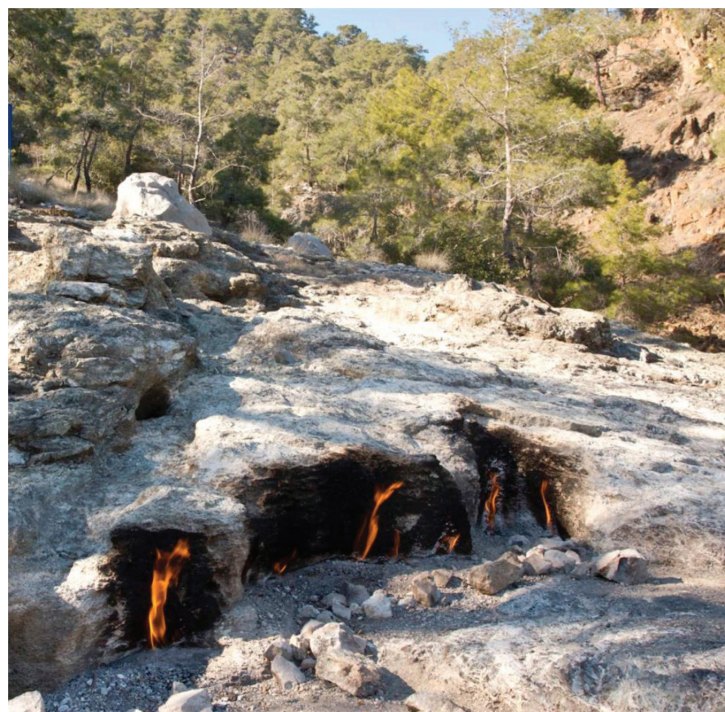


Photo du gaz brûlant en continu à Chimère (aussi appelé Yanartas), près d'Antalya en Turquie. Selon la légende, il serait la source de la première flamme olympique. Wikimedia/W. Neuheisel (licence cc-by-2.0).

façon dont les systèmes de détection sont conçus. Une grande partie des chromatographes en phase gazeuse utilisent l'hydrogène comme gaz-vecteur ; dans ce cas, l'hydrogène présent dans l'échantillon ne sera pas détecté.

Cependant, il existe de nombreux exemples dans la littérature scientifique de détections d'hydrogène dans la nature. L'article de synthèse [1] résume et classe les découvertes d'hydrogène en tant que gaz libre dans différents environnements : inclusions dans des roches de divers types, gaz dissous dans les eaux souterraines. L'hydrogène a été détecté à des concentrations élevées, souvent en tant que gaz majeur, dans tous les types de milieux géologiques : sédiments, roches métamorphiques et ignées, socle cristallin, gisements de minéraux et mines de charbon, réservoirs de pétrole et de gaz, aquifères.

Plusieurs mécanismes de génération d'hydrogène ont été proposés qui peuvent être classés dans les catégories suivantes :

- dégazage de l'hydrogène profond venant du cœur et du manteau de la Terre [2],
- réaction de l'eau avec les roches ultrabasiques (serpentinisation) [3],
- contact de l'eau avec les agents réducteurs dans le manteau [4],
- interaction de l'eau avec les surfaces rocheuses fraîchement exposées [5],
- décomposition des hydroxydes dans la structure des minéraux [6],
- radiolyse naturelle de l'eau [7],
- décomposition de la matière organique [8],
- activité biologique [8],
- activités anthropiques [9] et plus.

Les estimations de flux d'hydrogène sont données pour chaque mécanisme où elles étaient disponibles. En faisant la somme de toutes les sources géologiques, l'article propose une estimation actualisée du débit annuel d'hydrogène de 23 Tg/an<sup>(2)</sup>. Cette valeur est d'un ordre de grandeur supérieur à l'estimation précédente [10], mais très probablement encore insuffisante pour tenir compte des découvertes récentes des flux diffusifs d'hydrogène, qui sont présents sur tous les continents.

Parmi tous les mécanismes proposés, les deux premiers sont susceptibles de s'avérer les plus productifs et nécessitent des commentaires. La serpentinisation est un processus métamorphique dans lequel les roches ultrabasiques – en terminologie géologique ce sont des roches très pauvres en silice, SiO<sub>2</sub> et contenant du Fe<sup>2+</sup> – sont oxydées par l'eau en donnant la serpentine – une famille de minéraux du groupe des silicates – et en produisant de l'hydrogène. Ce processus naturel a été bien étudié et beaucoup d'articles sont disponibles sur le sujet. Jusqu'à présent, ce mécanisme était considéré comme la source principale d'hydrogène naturel.

Par contre, en faisant la synthèse, il est devenu clair que l'hydrogène profond (du cœur et du manteau de la Terre) est très probablement la plus grande source d'hydrogène dans la nature. Il est très probable que de grandes quantités d'hydrogène soient stockées à l'intérieur de la Terre depuis sa formation [2, 11-12]. L'hydrogène sera chimiquement lié sous forme d'hydrures avec des éléments variés. Les études théoriques et les expériences faites au laboratoire montrent que les hydrures de fer (FeH<sub>x</sub>) – Fe étant l'un des éléments principaux dans la composition de la Terre – sont stables sous les conditions de pression et de température prévalant à l'intérieur de la planète [13]. L'ajout d'hydrogène dans le noyau terrestre permet de résoudre l'énigme de la densité de ce dernier, qui est 10 % inférieure à celle de l'alliage Fe-Ni – qui est supposé constituer le noyau mais dont les propriétés ne correspondent pas aux données d'études sismiques. La découverte récente du premier hydrure naturel VH<sub>2</sub> [14] va stimuler des recherches nécessaires pour développer davantage ce sujet.

Progressivement et au cours du temps géologique, les hydrures se décomposent, ce qui génère le flux de l'hydrogène constant en surface de la Terre qui a été découvert par les études récentes. Ce mécanisme est purement inorganique et n'est pas lié aux dépôts fossiles. Cela veut dire qu'en utilisant cet hydrogène, il n'y aura pas d'émissions de dioxyde

de carbone. La génération d'hydrogène naturel dans la Terre via un tel processus géochimique naturel est active dans le temps présent ; elle était active dans le passé et le restera pendant des millions d'années. Pour cette raison, l'hydrogène géologique naturel est une ressource propre et renouvelable.

Actuellement, la plupart de l'hydrogène au monde est produit à partir du méthane par un procédé de vaporeformage qui libère du CO<sub>2</sub>. La production par électrolyse de l'eau gagne progressivement du terrain mais ne sera pas économiquement compétitive comparée au vaporeformage dans le moyen terme [15].

Parce que le débit total d'hydrogène géologique a été sous-estimé et se révèle plus élevé qu'on ne le pensait auparavant, la possibilité d'utiliser cette nouvelle source d'énergie est ouverte. La meilleure chose à propos de l'exploration de l'hydrogène naturel est qu'il n'est pas nécessaire de dépenser de l'énergie pour le produire. Pour cette raison, l'hydrogène naturel devrait être moins cher à la production que l'alternative actuelle la moins chère.

Le premier puits de production, qui fonctionne depuis 2012, fournit 98 % d'hydrogène pur [16] ! Les programmes d'exploration des pionniers commencent dans différents coins du monde. Mon entreprise, Natural Hydrogen Energy LLC, travaille sur l'exploration et la production en Amérique du Nord, où nous avons foré avec succès notre premier puits d'exploration en 2019 ; nous travaillons actuellement sur l'expansion du projet. D'autres sociétés sont actives en Afrique et en Amérique du Sud, et depuis peu en Australie, en Asie et en Europe. Cela signifie que les explorations sont présentes dans toutes les parties du monde ; il est donc possible d'affirmer que l'exploration de l'hydrogène naturel a officiellement débuté !

L'hydrogène naturel participe aux divers processus naturels. C'est aussi une source « d'énergie » pour de nombreux micro-organismes et il joue un rôle important dans la biosphère superficielle et profonde. Bien qu'il soit établi que les micro-organismes peuvent produire de l'hydrogène, le fait est que dans la nature, les bactéries productrices d'hydrogène coexistent toujours avec un organisme approprié utilisant l'hydrogène. De plus, les producteurs d'hydrogène ne peuvent exister sans consommateurs d'hydrogène, qui inhibe leur activité. Ainsi, tout l'hydrogène produit biologiquement est rapidement converti en d'autres composés.

Une grande partie des micro-organismes utilise le CO<sub>2</sub> pour assimiler de l'hydrogène. Le produit de cette réaction est le méthane, d'où vient leur nom « méthanogènes ». Les méthanogènes sont présents dans tous les types de sols, même dans les environnements secs du désert, mais aussi sous la glace de l'Antarctique et dans les profondeurs de la croûte terrestre. Il est possible que l'hydrogène fut le premier « aliment » pour les formes de vie simples durant les toutes premières périodes de l'évolution.

L'hydrogène profond est d'une importance cruciale dans la composition structurale de la Terre et influence un large éventail de phénomènes naturels allant du volcanisme à la formation de minéraux, de l'atmosphère au climat et à l'intégrité de la couche d'ozone. Par exemple, l'hydrogène d'origine géologique n'a pas été pris en compte par les études atmosphériques mais il aurait dû l'être, car en tant que réducteur puissant, il a un impact direct sur les concentrations d'ozone et de son précurseur OH-radical.

Les tests d'hydrogène peuvent être utilisés pour l'étude des environnements naturels, pour la surveillance et même la prévision des tremblements de terre, pour la cartographie des failles et la recherche de minéraux. Il a été proposé que l'hydrogène naturel a joué un rôle important dans la formation des hydrocarbures, et même des diamants !

En conclusion, la revue couvre diverses branches des géosciences [1] et devrait intéresser des spécialistes d'autres domaines et un public plus large, surtout en vue de l'utilisation d'hydrogène naturel en tant que nouvelle source d'énergie renouvelable.

(1) Dans l'article, le terme « hydrogène » signifie H<sub>2</sub> (sauf autres précisions).

(2) Téraграмme par an (Tg), soit 10<sup>12</sup> g/an ou 10<sup>6</sup> T/an.

[1] V. Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: a comprehensive review, *Earth Science Rev.*, **2020**, 203, art. 103140.

[2] V.N. Larin, *Hydridic Earth: the New Geology of Our Primordially Hydrogen-rich Planet*, Polar Publishing, Alberta, **1993**.

[3] T.M. McCollom, C. Donaldson, Generation of hydrogen and methane during experimental low-temperature reaction of ultramafic rocks with water, *Astrobiology*, **2016**, 16, p. 389-406.

[4] H.D. Holland, Volcanic gases, black smokers, and the great oxidation event, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **2002**, 66, p. 3811-826.

[5] K. Suzuki, T. Shibuya *et al.*, Experimental hydrogen production in hydrothermal and fault systems: significance for habitability of seafloor H<sub>2</sub> chemoautotroph microbial ecosystems, *Subseafloor Biosphere Linked to Hydrothermal Systems*, J. Ishibashi, K. Okino, M. Sunamura (eds), Springer, **2015**, p. 87-94.

[6] F.T. Freund, J.T. Dickinson, M. Cash, Hydrogen in rocks: an energy source for deep microbial communities, *Astrobiology*, **2002**, 2, p. 83-92.

[7] B. Sherwood Lollar, T.C. Onstott *et al.*, The contribution of the Precambrian continental lithosphere to global H<sub>2</sub> production, *Nature*, **2014**, 516, p. 379-382.

[8] D.H. Ehhalt, F. Rohrer, The tropospheric cycle of H<sub>2</sub>: a critical review, *Tellus B Chem. Phys. Meteorol.*, **2009**, 61, p. 500-535.

[9] D.H. Barnes, S.C. Wofsy *et al.*, Hydrogen in the atmosphere: observations above a forest canopy in a polluted environment, *J. Geophys. Res.*, **2003**, 108, <https://doi.org/10.1029/2001JD001199>

[10] A.L. Gilat, A. Vol, Degassing of primordial hydrogen and helium as the major energy source for internal terrestrial processes, *Geosci. Front.*, **2012**, 3, p. 911-921.

[11] E. Ohtani, N. Hirao *et al.*, Iron-water reaction at high pressure and temperature, and hydrogen transport into the core, *Phys. Chem. Miner.*, **2005**, 32, p. 77-82.

[12] X. Yang, H. Keppler, Y. Li, Molecular hydrogen in mantle minerals, *Geochem. Perspect. Lett.*, **2016**, 2, p. 160-168.

[13] E.I. Isaev, N.V. Skorodumova *et al.*, Dynamical stability of Fe-H in the Earth's mantle and core regions, *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, **2007**, 104, p. 9168-171.

[14] L. Bindi, F. Cámara *et al.*, Discovery of the first natural hydride, *Am. Mineral.*, **2019**, 104, p. 611-614.

[15] P. Nikolaidis, A. Poullikkas, A comparative overview of hydrogen production processes, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **2017**, 67, p. 597-611.

[16] A. Prinzhofer, C.S. Tahara Cissé, A.B. Diallo, Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali), *Int. J. Hydrogen Energy*, **2018**, 43, p. 19315-326.

**Viacheslav ZGONNIK,**

Directeur de la startup Natural Hydrogen Energy LLC.

\* [zgonnik@nh2e.com](mailto:zgonnik@nh2e.com)

<http://nh2e.com>

**CHIMIE ET...**  
 Déjà 23 titres dans cette collection...  
 Des livres à mettre en toutes les mains !

Commandez en ligne sur [laboutique.edpsciences.fr](http://laboutique.edpsciences.fr)

**edp sciences**