

## L'HYDROGENE NATUREL

### Sommaire

- 1. Introduction**
- 2. Les localisations de l'hydrogène naturel**
- 3. D'où provient l'hydrogène naturel ?**
- 4. Exemples de production d'hydrogène naturel**
- 5. Conclusion**

### 1. Introduction

Jusqu'à ce jour, l'hydrogène à l'état moléculaire, H<sub>2</sub>, était considéré comme n'existant pas dans la nature si ce n'était qu'à l'état de quelques traces. Pour en disposer en grandes quantités, il fallait, comme il le faut encore, le produire par les procédés chimiques ou électrochimiques décrits dans le présent chapitre 3, fiches 3.1.1 à 3.3.2. Or, depuis quelques décennies, des émanations d'hydrogène naturel ont été mises en évidence, d'abord au fond des océans et plus récemment sur terre. Un état de fait qui pourrait renforcer l'intérêt des atouts de l'hydrogène s'il est avéré qu'il est disponible dans la nature en grandes quantités et qu'il est techniquement récupérable sans trop de difficultés et à un coût acceptable. Cet hydrogène est dit naturel et pour ce qui est de lui attribuer une couleur caractérisant son origine - ce qui est actuellement l'usage - il a été décidé de lui attribuer le blanc. Et lorsqu'il est issu directement de processus chimiques de la croûte terrestre on le dénomme « hydrogène natif ».

Si le hasard avait fait découvrir un petit champ de gaz hydrogène en 1906 en France (à Vaux en Bugey dans l'Ain) en cherchant du sel, c'est dans les années 1930 que la présence d'hydrogène naturel fut révélée dans les sédiments du Middle West aux Etats-Unis. Et seulement dans les années 1970, des travaux scientifiques ont confirmé ce fait. Il a ainsi été prouvé que l'hydrogène est présent :

- Dans des dorsales médio-océaniques sous forme de fluides hydrothermaux riches en H<sub>2</sub>, ainsi que dans les systèmes hydrothermaux terrestres, notamment en Islande (36% de H<sub>2</sub>);
- Dans les gaz de volcans, parmi eux, l'Etna en Sicile (58% de H<sub>2</sub>), Augustin et Trident en Alaska (52% de H<sub>2</sub>), Kliuchevskoi au Kamchatka (82% de H<sub>2</sub>), etc. ;
- Dans les eaux de sources hyperalcalines de divers massifs de péridotites, notamment en Oman (jusqu'à 99% de H<sub>2</sub>), dans les Zambales aux Philippines, dans le sud de la Turquie, etc. ;
- Dans la zone de faille active majeure de San Andreas en Californie ;
- Dans diverses mines, notamment en Afrique du Sud, en Russie et plus récemment en France dans le bassin lorrain ;
- À plusieurs kilomètres de profondeur dans des forages super-profonds de Kola en Russie ou de Kryvyi Rih en Ukraine.

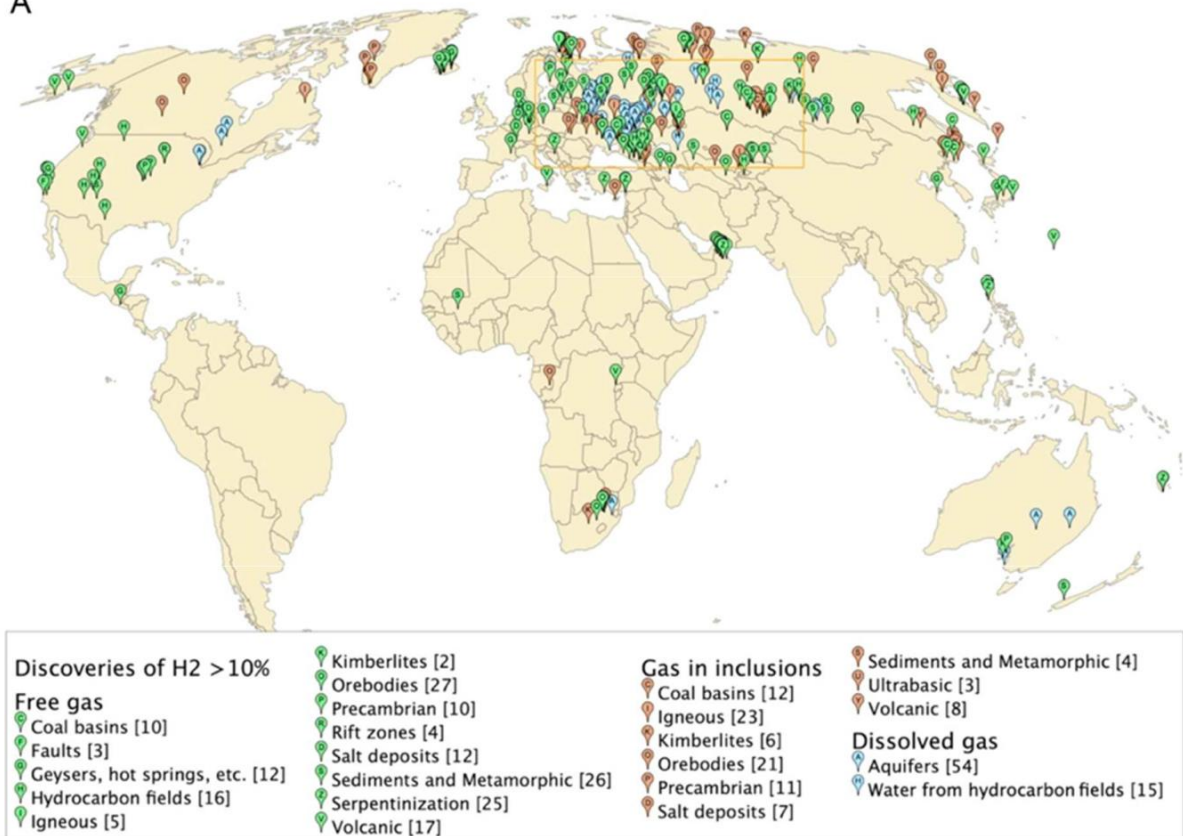
En dépit de ces découvertes, cette présence d'hydrogène a été considérée, jusqu'à ces dernières années, comme une simple curiosité géologique. Compte-tenu des contextes géologiques dans lesquels il a été trouvé, son exploitation paraissait difficile et encore moins rentable. Pourtant, récemment, dans plusieurs régions continentales, des flux continus d'hydrogène naturel ont été mis en évidence et pourraient présenter un réel intérêt économique. En effet, ce sont plusieurs centaines de structures géologiques émettant de l'hydrogène qui ont été découvertes dans les parties européennes de la Russie [1]. Ces structures sont des dépressions de surface, de forme circulaire et peu profondes, dont la taille peut varier d'une centaine de mètres à plusieurs kilomètres de diamètre. Dans les régions cultivées, la périphérie de ces structures est souvent soulignée par une décoloration du sol associée à une végétation anormalement développée. Le centre est, lui, marécageux voire occupé par un lac. A l'intérieur de ces cercles, dans le sol, la concentration en hydrogène moléculaire est élevée, alors qu'à l'extérieur, aucune trace n'est détectée. Le débit d'hydrogène gazeux de certaines de ces structures est estimé pouvoir atteindre 27 000 m<sup>3</sup> par jour.

Dans des études plus récentes, des chercheurs ont démontré l'existence d'autres structures équivalentes émettant de l'hydrogène, cette fois à l'est des États-Unis à Carolina Bays [2], puis au Brésil et au Mali [3]. Il s'agit de dépressions peu profondes et ovoïdes. Des centaines de milliers de structures de ce type sont présentes sur la côte de l'Atlantique. Les études réalisées à Carolina Bays ont montré qu'elles sont comparables à celles observées en Russie. D'après les scientifiques spécialistes, il semblerait même que ces "fuites" d'hydrogène soient détectables dans toutes les régions du monde, y compris en France.

## **2. Les localisations de l'hydrogène naturel**

Une synthèse récente de la littérature scientifique [4] 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. 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 et dans les aquifères.

A



*Figure 1. Carte extraite de l'article de la référence [4], montrant les détections d'hydrogène dans divers environnements à la surface de la Terre en concentrations > 10% vol. A noter la forte densité de repères en Europe de l'Est et en Asie du Nord. Cela est dû au fait que les prospections ont été plus actives dans ces régions et non pas qu'il s'y trouve plus d'hydrogène naturel. Cela illustre le point de vue selon lequel l'hydrogène naturel a été négligé.*

### – Au fond des océans

Des émanations fluides chargées en hydrogène furent mises en évidence dans les années 1970 sur la dorsale océanique de l'est pacifique. Depuis, de nombreux sites océaniques émettant des mélanges de gaz en solution dans l'eau à forte proportion d'hydrogène ont été découverts sous les fonds atlantiques près des Açores et plus récemment sur la dorsale arctique.

### – En montagne sur la trace des anciens océans

Dans des zones à relief montagneux, on peut citer les émanations aux Philippines, en Oman et en Turquie dont certaines donnent lieu à des feux permanents connus depuis l'Antiquité comme ceux de Chiméra en Turquie ou de Nagsasa aux Philippines.



*Figure 2. Photographie du gaz qui brûle en continu à Chimère (parfois aussi appelé Yanartaş), près d'Antalya en Turquie. Le gaz contient 7,5–11,3% H<sub>2</sub>. Ces feux actifs sont connus depuis plus de 2500 ans et selon la légende seraient la source de la première flamme olympique.*



*Figure 3. Émanation d'hydrogène de Nagsasa aux Philippines (roches brûlées par les flammes transparentes).*

## – Dans la croûte continentale

Nombre de forages de gaz à grandes profondeurs en Amérique du Nord, en Russie et en Suède ont révélé la présence de gaz en partie constitué d'hydrogène, cela dans des roches très anciennes au-dessous des couches sédimentaires où le pétrole n'est pas recherché.

C'est également dans des exploitations minières de charbon, de métaux, de diamants que des gaz contenant de l'hydrogène ont été libérés. C'est ainsi qu'en France, plus précisément en Lorraine, dans l'ancien bassin houiller de Folschviller en Moselle, un tel gisement a récemment été découvert par une équipe de chercheurs du laboratoire de géologie GéoRessources de l'Université de Lorraine associé au CNRS en liaison avec la Française de l'Energie (FDE) [5]. Les investigations menées jusqu'à 1 100m de profondeur, ont révélé que les gaz enfouis avaient une teneur en hydrogène de 15 à 17 %. D'après les estimations, il se pourrait que cet hydrogène soit produit à plus de 3 000 mètres de profondeur par action de l'eau sur les composés ferreux (cf. § 3) des anciennes mines de fer de cette région. La teneur pourrait y dépasser alors 90 % ! Ce gisement d'une profondeur estimée à 6000m, pourrait au total emmagasiner 46 millions de tonnes d'hydrogène. Un contexte qui fait que l'intérêt du gisement est en cours d'expertise avant que soit ou non donnée l'autorisation de poursuivre l'exploration et à terme d'en envisager l'exploitation à l'échelle industrielle.



*Figure 4. Sonde conçue au laboratoire GéoRessources utilisée sur le site pilote de Folschviller. (Permet d'analyser les gaz à plus de 1000 mètres de profondeur).*

En Russie, en 2010, la surprenante découverte d'émanations d'hydrogène à la surface du sol [1], d'abord accueillie avec perplexité, a été confirmée. Comme il a été dit plus haut, elles apparaissent au milieu de structures circulaires, généralement en légère dépression d'un diamètre de plusieurs centaines de mètres à quelques km. Elles sont bordées d'une couronne blanchâtre due à l'altération des sols. Des mesures effectuées à 1 m de profondeur ont permis d'évaluer à près de 27 000 Nm<sup>3</sup> par jour et par km<sup>2</sup> la quantité de gaz émise, valeur obtenue en prenant en compte la diffusion de l'hydrogène dans le sol et dans l'air.

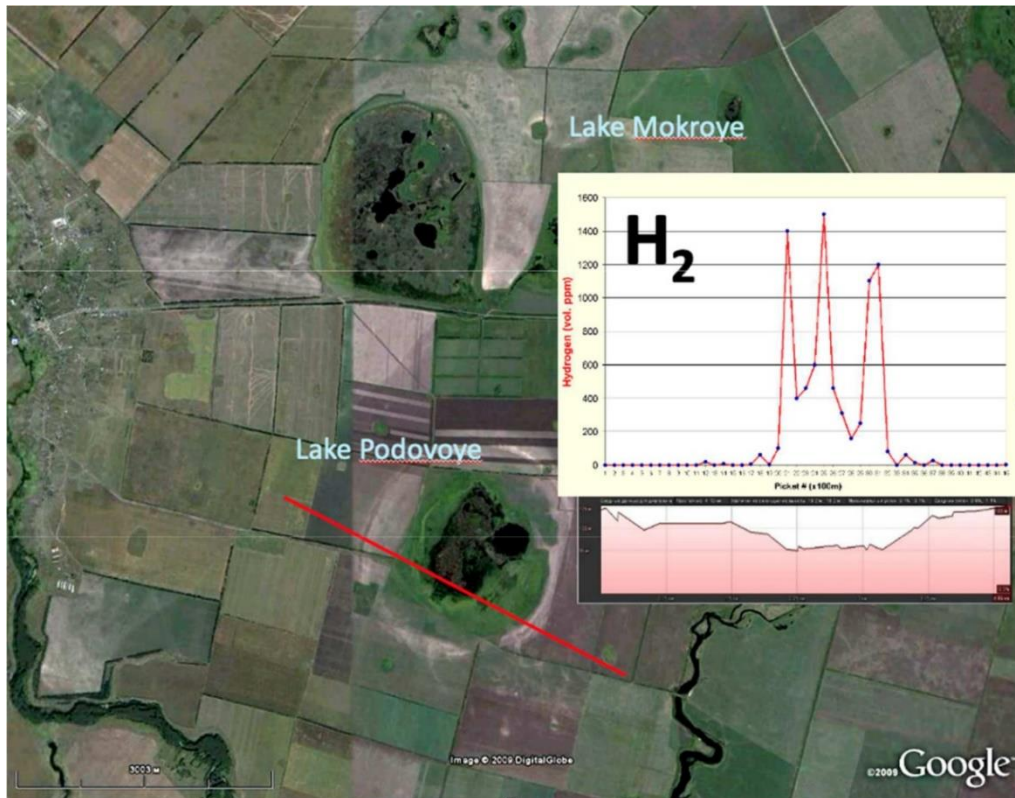


Figure 5. Zone d'émanations d'hydrogène en Russie. Le diamètre du cercle est 2.5 km.

De récentes prospections ont montré que ces structures circulaires existaient en d'autres points du globe comme les dépressions elliptiques, les « Carolina Bays », en Caroline du Nord déjà citées [2]. Leur taille varie de quelques dizaines de mètres à plusieurs kilomètres. Leur origine était indéterminée jusqu'à maintenant. Il émane de certaines d'entre-elles des quantités notables d'hydrogène (dizaines de mètres cubes par jour) et, si toutes ne sont pas émettrices d'hydrogène, il est prévisible que certaines le soient comme celles existantes au centre du Brésil en cours d'étude dont il est question ci-dessous.

### 3. D'où provient l'hydrogène naturel ?

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

- Dégazage de l'hydrogène profond venant du cœur et de manteau de la Terre ;
- La réaction de l'eau avec les roches ultrabasiques (serpentinisation) ;
- Le contact de l'eau avec les agents réducteurs dans le manteau ;
- L'interaction de l'eau avec les surfaces rocheuses fraîchement exposées ;
- La décomposition des hydroxydes dans la structure des minéraux ;
- La radiolyse naturelle de l'eau (décomposition de l'eau par la radioactivité naturelle des roches) ;
- La décomposition de la matière organique ;
- L'activité biologique ;
- Les activités anthropiques et plus.

Parmi tous ces mécanismes, seulement les deux premiers sont en mesure de produire les quantités significatives d'hydrogène. Ce sont en particulier eux qui le plus probablement ont produit les grandes quantités d'hydrogène que semblent retenir le sous-sol lorrain d'après la récente découverte évoquée au § précédent.

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 très étudié et a donné lieu à de nombreux articles

disponibles à ce jour. Il est considéré comme la source principale d'hydrogène naturel. D'une production permanente dans la couche terrestre, il est aussi dénommé hydrogène natif.

La génération d'hydrogène biologique par les algues et les bactéries se réalise par des mécanismes impliquant comme catalyseurs des enzymes tels que les hydrogénases et les nitrogénases (cf. Fiche 3.3.2). Ces mécanismes ont été mis en évidence au laboratoire, mais dans la nature la concentration d'hydrogène doit rester faible pour ne pas être un poison pour les microorganismes. Une telle régulation est faite dans la nature par les microorganismes qui s'appellent méthanogènes. Ils utilisent l'hydrogène pour le transformer en méthane. Il n'est donc pas possible, dans de telles conditions, d'envisager l'exploitation de cet hydrogène.

L'hydrogène profond provenant du cœur et du manteau de la Terre correspond très probablement à la plus grande source naturelle. Plusieurs travaux suggèrent qu'il est très probable que de grandes quantités d'hydrogène soient stockées à l'intérieur de la Terre depuis sa formation. L'hydrogène y serait 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>), un des éléments principaux dans la composition de la Terre, sont stables sous les conditions de pression et de température prévalant à l'intérieur du globe. L'ajout d'hydrogène dans le noyau terrestre permet de résoudre l'énigme de la densité de ce dernier, qui est 10% inférieure de celle de l'alliage Fe-Ni (qui est supposé constituer le noyau mais dont les propriétés ne correspondent pas aux données d'études sismiques). Par dégazage, des quantités d'hydrogène, qui ont été piégé dans le noyau terrestre, s'en échappent en permanence.

Ces mécanismes sont inorganiques et ne sont donc pas liés aux dépôts fossiles. Cela veut dire qu'en utilisant cet hydrogène naturel il n'y aura pas d'émissions de dioxyde de carbone. La génération d'hydrogène dans la Terre via ce processus géochimique naturel est active dans le temps présent, était active dans le passé et restera active pendant des millions d'années. Pour cette raison, l'hydrogène géologique naturel est une source d'énergie renouvelable.

Le plus grand avantage de l'hydrogène naturel est qu'il n'est pas un vecteur d'énergie mais une source d'énergie primaire car il n'est pas nécessaire de dépenser de l'énergie pour l'obtenir contrairement à toutes les autres méthodes utilisées pour sa production.

Il est à remarquer que contrairement aux ressources fossiles pétrolifères ou gazières, l'hydrogène ne peut pas rester dans le sol sur des temps géologiques aussi longs car il est à la fois volatil et réactif. Il pourrait transiter par des poches pendant quelques centaines d'années à des profondeurs très variables. L'exploitation de l'hydrogène temporairement emprisonné dans de telles poches devrait, a priori, être possible par les techniques utilisées pour l'exploitation et la production du pétrole, du gaz ou des minerais. Pour localiser ces poches d'hydrogène en profondeur, la géophysique, la sismologie, la gravimétrie ou encore le magnétisme peuvent être sollicités.

L'exploration d'hydrogène naturel devrait donc permettre aux producteurs de pétrole et de gaz d'utiliser leurs infrastructures et leur expertise pour convertir leurs exploitations des combustibles fossiles à celles d'une ressource non fossile et ainsi atteindre les objectifs mondiaux d'énergie propre beaucoup plus rapidement.

En outre, si l'hydrogène est associé à de l'eau dans un aquifère, il pourrait être possible de coupler son exploitation avec celle de la géothermie.

#### **4. Exemples de production d'hydrogène naturel**

Au Mali, au nord de Bamako, émane du sol un flux permanent d'hydrogène exploité depuis 2012 par la compagnie *Petroma* devenue récemment *Hydroma S.A.* Cette nouvelle société a pour objectif d'étendre l'exploitation de ce gisement ainsi que celui de sites voisins avec la perspective d'en faire une des ressources énergétiques du pays. A titre de démonstration a été implantée une petite station de production d'électricité (puissance 7 kW) avec une turbine à hydrogène qui depuis 2012 alimente l'éclairage du village voisin [3].



*Figure 6. Démonstrateur d'exploitation d'hydrogène naturel au Mali*

Au Brésil, la société *GEO4U* et la filiale locale d'*ENGIE*, suivent les échappements d'hydrogène dans un bassin du centre du pays avec pour but d'établir la validité d'une exploitation de ces émanations.

En France, la société *45-8 Energy* spécialisée dans la détection de l'hélium dans le sous-sol élargit ses recherches à celle de l'hydrogène. Une étude en cours a récemment révélé une telle présence dans les Pyrénées (Colloque sur l'hydrogène naturel, Société Géologique de France, Paris, juin 2021). S'y ajoute les travaux menés dans le bassin houiller lorrain évoqués au § 2.

Aux USA, la société *Natural Hydrogen Energy LLC* a fait le premier forage d'exploration d'hydrogène naturel en 2019 et travaille actuellement sur le lancement du site pilote et sur l'expansion du projet.

Au Nord de l'Espagne, à 100 km de Saragosse, un forage pétrolier de l'*Empresa Nacional de Petroleos de Aragon* a mis en évidence un gisement souterrain d'hydrogène dont les possibilités d'exploitation sont étudiées par la société *Helios* [6]. Si cette exploitation devient possible, l'hydrogène produit serait alors, d'après les intéressés, de « l'hydrogène d'or ».

## **5. Conclusion**

L'hydrogène naturel sous sa forme moléculaire  $H_2$  est abondant dans le milieu géologique. Il est généré en permanence dans les profondeurs de la Terre par les réactions inorganiques ce qui permet de le classer comme une ressource renouvelable. Est-il, à un moyen terme, exploitable en tant que combustible respectueux de l'environnement ? La réponse est probablement oui. Sa présence sur ne relève plus d'une curiosité géologique à caractère exceptionnel mais d'une certitude. Il faut prospecter, comprendre, expliquer, expérimenter, en un mot, s'investir dans une véritable discipline nouvelle dont l'aboutissement pourrait parfaitement donner lieu à une filière d'approvisionnement en énergie propre et renouvelable par un apport d'hydrogène produit sans carbone, abondant et peu coûteux. En cela, une première étape pourrait être ce qui se passe actuellement en Lorraine. D'ailleurs, en février 2022, l'hydrogène naturel a été ajouté comme ressource dans le « Code minier français » en qualité d'hydrogène natif [7].



---

## **Références :**

1. N.V. Larin, V. Zgonnik, S. Rodina, et al. Natural Molecular Hydrogen Seepage Associated with Surficial, Rounded Depressions on the European Craton in Russia. *Natural Resources Research*, **2015**, 24, 369–383, <https://doi.org/10.1007/s11053-014-9257-5>
2. V. Zgonnik, V. Beaumont, E. Deville, et al. Evidence for natural molecular hydrogen seepage associated with Carolina bays (surficial, ovoid depressions on the Atlantic Coastal Plain Province of the USA). *Progress in Earth and Planetary Science*, **2015** 2, 2-31, <https://doi.org/10.1186/s40645-015-0062-5>
3. A. Prinzhofer, C.S. Tahara Cissé, A.B. Diallo, Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali). *International Journal for Hydrogen Energy*, **2018**, 43, 19315–19326, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.193>
4. V. Zgonnik, The Occurrence and Geoscience of Natural Hydrogen: A Comprehensive Review. *Earth-Science Reviews*, **2020**, 203, art. 103140, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103140>
5. Un gisement géant d'hydrogène en Lorraine  
[Un gisement géant d'hydrogène en Lorraine ? | CNRS Le journal](#)
6. <https://fuelcellsworks.com/news/ascent-hydrogen-fund-signs-new-deal-with-spains-helios-aragon-to-explore-and-produce-gold-hydrogen/>
7. [Code minier \(nouveau\) - Légifrance \(legifrance.gouv.fr\)](#)

## **Pour en savoir plus :**

- L'ouvrage « Hydrogène naturel, la prochaine révolution énergétique ? » par Alain Prinzhofer et Eric Deville. Edition Belin, Paris, 2015.
- A. Prinzhofer, C.S. Tahara Cissé, A.B. Diallo, Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali). *International Journal for Hydrogen Energy*, **2018**, 43, 19315–19326, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.193>
- La récente synthèse scientifique par Viacheslav Zgonnik « The Occurrence and Geoscience of Natural Hydrogen: A Comprehensive Review » *Earth-Science Reviews*, 2020, **203**, 103140  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012825219304787>
- L'article « L'hydrogène naturel : curiosité géologique ou source d'énergie majeure dans le futur ? » par Isabelle Moretti dans *Connaissance des Énergies*. Mai 2020.  
<https://www.connaissancedesenergies.org/tribune-actualite-energies/lhydrogene-naturel-curiosite-geologique-ou-source-denergie-majeure-dans-le-futur>
- L'Edito par René Trégouët « L'hydrogène naturel pourrait devenir une véritable source d'énergie propre et inépuisable... ». Juillet 2020.  
<https://www.rtf.fr/l-hydrogene-naturel-pourrait-devenir-veritable-source-d-energie-propre-et-inepuisable/article>

