

IFPEN et l'hydrogène naturel

Un numéro très récent de *Science* consacre un long article rédactionnel à l'hydrogène naturel, sous le titre « Hidden hydrogen: does Earth hold vast stores of a renewable, carbon-free fuel? » [1]. Ceci « consacre » pour ainsi dire ce sujet, enfin, comme une question scientifique d'envergure, avec potentiellement un impact sociétal majeur : face au changement climatique annoncé, induit par l'augmentation inexorable du CO₂ produit par la combustion des hydrocarbures fossiles depuis le début de l'ère industrielle, l'humanité pourrait-elle bénéficier d'une source inattendue d'énergie chimique propre et pratiquement inépuisable à son échelle temporelle ?

L'article de *Science*, en libre accès, fait un point complet sur l'état de la question aujourd'hui, et mon propos ici n'est pas de le résumer. Du reste, il ne fait que compléter l'information déjà offerte naguère en français aux lecteurs de *L'Actualité Chimique* curieux et attentifs [2-3].

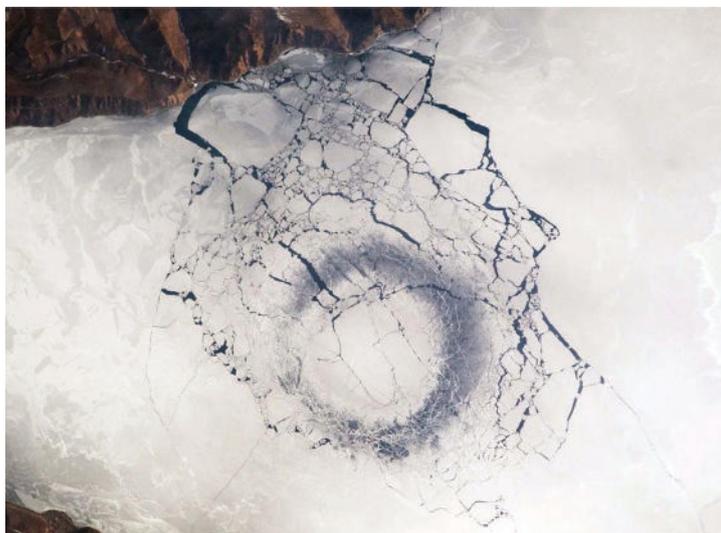
Je souhaite plutôt témoigner du rôle très actif joué par la recherche française, en particulier à IFPEN depuis la fin des années 2000 dans l'émergence de ce sujet contre vents et marées (surtout vents contraires d'ailleurs). Témoin privilégié, et acteur dans une certaine mesure, je l'ai été dans ma fonction de responsable du programme de recherche exploratoire soutenu et suivi par la Direction scientifique d'IFPEN, depuis 1999 jusqu'à mon départ en retraite fin 2016. Le premier projet « NEOGEO » sur l'hydrogène naturel a été proposé en 2008 par Alain Prinzhofer, un de nos éminents géochimistes à l'époque, et Eric Deville, géologue structuraliste. Ce dernier a piloté le projet jusque fin 2012 et a été relayé par Valérie Beaumont, géochimiste. Le projet a produit de la connaissance jusqu'en 2013, puis des vents contraires ont momentanément stoppé l'esquif. Il s'est toutefois prolongé par diverses actions, thèses de doctorat, projets collaboratifs avec l'industrie, et aujourd'hui Bruno Garcia pilote la participation d'IFPEN au GdR HydroGEMM [4].

Le projet exploratoire NEOGEO, quant à lui, était au départ inspiré par les découvertes et premières caractérisations des « fumeurs » sous-marins au fond des dorsales médio-océaniques, notamment par les océanographes d'IFREMER au cours de plongées à ces très grandes profondeurs [5]. L'origine de ces geysers sous-marins profonds, émetteurs de gaz riches à très riches en H₂ est interprétée comme la manifestation d'un processus de serpentinisation d'ophiolites ultra-basiques ; autrement dit, de l'oxydation par l'eau de mer infiltrée, de ce matériau mantellique riche en Fe^{II}, qui émerge en ces frontières de plaques tectoniques et alimente le plancher océanique en formation.

L'exploitation de ces sources sous-marines à de grandes profondeurs (plusieurs km) et au plus loin des côtes (plusieurs milliers de km) paraissant hors d'atteinte en l'état de la technologie, nos collègues avaient proposé d'explorer les émissions d'analogues à terre qu'ils avaient documentés, des massifs

ophiolitiques exhumés en partie par la subsidence de plaques. Ces massifs sont les sièges de phénomènes géochimiques très particuliers, comme des sources thermales à pH 11 en Oman, ou des « feux éternels » comme aux Philippines, en Turquie (Mont Chimaera, près de Yanartas, réputé antre de la Chimère dans l'Antiquité, et zone à risque sismique majeur comme en a témoigné tragiquement l'actualité de février cette année). Ces feux sans flammes ne sont autres que des émissions d'H₂ en combustion au contact de l'air. La Nouvelle-Calédonie est un massif ophiolitique, ce qui va de pair avec sa richesse minière en nickel. Les missions de terrain et le travail de laboratoire financés par le projet ont permis à notre équipe de pionniers d'échantillonner gaz, roches et eaux thermales, de cartographier les sites de ces régions, et de fait, de trouver partout et quantifier des émanations sensibles d'hydrogène naturel, confirmant le bien-fondé de leur intuition.

Toutefois, le projet a pris un tournant, pour moi décisif, en 2010, à partir d'une intervention par courrier électronique d'un chimiste bien connu, le professeur Armand Lattes, président de la Société Chimique de France de 2004 à 2008. Ce courrier, destiné comme il se doit au directeur général adjoint R&D d'IFPEN de l'époque, m'a été transféré avec un commentaire interrogatif et dubitatif, mais la référence était de poids et je n'ai pas eu de difficultés à poursuivre l'instruction. Dans son courrier, A. Lattes introduisait auprès de notre DGA un jeune Ukrainien de Louhansk, Viacheslav Zgonnik (Slava), qui achevait une thèse en chimie dans un laboratoire de l'Université Paul Sabatier à Toulouse. Slava était en outre le co-fondateur et président de l'Association ukrainienne pour l'énergie hydrogène (UAHE). Averti des travaux entrepris à IFPEN, Slava proposait de nous mettre en contact avec le géologue russe Vladimir Nikolaievitch Larin (1939-2019) et son fils Nikolay, géologue lui aussi, qui venaient de découvrir des émanations d'H₂ naturel en Russie et Ukraine dans un contexte géologique très différent, les cratons, c'est-à-dire le socle ancien des continents, loin des marges. Le mécanisme de serpentinisation ne pouvait plus être invoqué pour interpréter ces émanations. Par ailleurs, le concept de « terre hydrurée » était très familier aux géologues post-soviétiques, mais très peu accepté dans le monde occidental. V.N. Larin en était l'un des théoriciens les plus actifs [6] et controversés, mais ses recherches incessantes sur le terrain avaient enfin débouché sur une découverte majeure : H₂ émane de la périphérie de dépressions quasi circulaires, de rayon de l'ordre de 100 m, détectables notamment via Google Earth, souvent par grappes. Une mission conjointe sur le terrain en Russie à l'automne 2010 permit alors à nos collègues de confirmer le phénomène. Ces « ronds de sorcière » ont depuis été identifiés dans les zones cratoniques d'autres continents (États-Unis, Brésil, Australie, Afrique...). V. Larin a discuté de sa théorie et de ses résultats de terrain lors d'un séminaire invité à IFPEN début 2011 (voir *figure*) : pour lui, H₂ naturel émane du manteau et du noyau, où il serait fixé notamment sous forme d'hydrures stables aux conditions de pression et température qui y règnent. J'ai appuyé le



Cette photo satellite, communiquée par V.N. Larin en 2011, couvre la pointe Sud-Ouest du lac Baïkal en Sibérie. C'est l'hiver. Le lac est gelé. Une bulle de gaz de plusieurs km de diamètre s'est accumulée sous la glace, développant une pression d'Archimède suffisante pour fracturer l'épaisse couche de glace (naguère, les rails du transsibérien passaient par le lac gelé qui offrait un raccourci très appréciable). Ce gaz est de l'hydrogène natif quasi pur. Le lac Baïkal situé vers le centre de la plaque eurasienne emplit une faille tectonique profonde, visiblement fuyarde...

financement d'un postdoc pour Slava, qui a rejoint IFPEN et le projet à mi-2011, et a pu contribuer aux missions d'étude suivantes, en Oman et aux États-Unis.

Parallèlement, je me suis intéressé aux théories de Larin, et plus spécifiquement à sa vision semi-quantitative de la formation des planètes dans un nuage protoplanétaire, très à contre-courant des idées admises : mon but était d'en évaluer plus avant la vraisemblance. J'en suis arrivé, en quelques mois d'heures supplémentaires à titre gracieux, à une quantification sur des bases un peu différentes, mais corroborée de manière très cohérente par les données de composition chimique des surfaces des planètes rocheuses de notre système solaire (Mars, Lune, Vénus, Mercure) résultant des différentes missions spatiales des six décennies passées. Dix ans de persévérance ont toutefois été nécessaires avant de vaincre l'indifférence polie des revues généralistes ou spécialisées, et dans le meilleur des cas le scepticisme des referees. Ce travail est enfin accessible à la communauté scientifique et donc peut de ce fait au moins être discuté [7-8]. Outre une évaluation de la réserve d'hydrogène disponible sous nos pieds, 10^{11} GT, qui serait donc pratiquement inépuisable à l'échelle de l'humanité, mais pas forcément accessible, ce travail donne une perspective originale sur nombre de questions, comme l'origine de l'eau (salée) sur Terre, la répartition radiale des éléments, et peut-être l'origine de la vie.

Les propos actuels d'Alain et Slava figurent en bonne place dans l'article de *Science*. Ils sont en effet plus que jamais engagés dans l'aventure aujourd'hui, en passe d'industrialisation. Il en est de même d'Isabelle Moretti, chercheuse à IFPEN avant de rejoindre la Direction de la Technologie d'Engie, où elle a impulsé la recherche sur H_2 naturel, puis l'UPPA où elle a continué [9-10] et l'Académie des technologies quelle informe

régulièrement sur le sujet avec le dynamisme qu'on lui connaît, je n'en doute pas.

Pour terminer cet à propos, quelques réflexions de chimiste de base sur une civilisation de l'hydrogène, naturel ou pas. L'usage énergétique de H_2 implique une consommation d' O_2 : l'oxygène, produit de la photosynthèse par la vie est abondant dans notre atmosphère mais limité, et surtout, une baisse significative de sa teneur serait une menace pour la biosphère actuelle. H_2 naturel ou vecteur énergétique ne peut donc bénéficier à l'humanité que temporairement, et avec une restriction de flux. La réaction produit de l'eau pure, précieuse ressource à ne pas gaspiller, ce qui sera plus aisé avec les piles à combustible, moins si des modules de post-condensation doivent être prévus. Une production compensatoire d' O_2 par électrolyse de l'eau par exemple, pour compenser une utilisation massive d' H_2 naturel, n'aurait pas de sens sur le plan du rendement énergétique. C'est pourquoi je pense que si l'exploitation d' H_2 naturel vient à maturité, et autorise effectivement une civilisation globale de l'hydrogène, ce ne pourra être que transitoire (quelques siècles ?), et sous condition d'efficacité et de limitation de la consommation énergétique, avant que le relais ne puisse être pris par la fusion nucléaire enfin maîtrisée. C'est toutefois, peut-être, une belle opportunité pour éviter un changement climatique destructeur. L'avenir nous le dira, si nous en avons un.

[1] E. Hand, Hidden hydrogen: does Earth hold vast stores of a renewable, carbon-free fuel?, *Science*, **2023**, 379(6633), p. 630-636.

[2] H. Toulhoat, L'hydrogène naturel : une ressource énergétique pour demain ?, *L'Act. Chim.*, **2021**, 446, p. 9-10.

[3] V. Zgonnik, L'hydrogène naturel, une nouvelle source d'énergie renouvelable, *L'Act. Chim.*, **2019**, 466, p. 35-37.

[4] www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/hydrogemm-les-chercheurs-se-plongent-lhydrogene-du-sous-sol

[5] J.L. Charlou, J.P. Donval, C. Konn, H. Ondréas, Y. Fouquet, High production and fluxes of H_2 and CH_4 and evidence of abiotic hydrocarbon synthesis by serpentinization in ultramafic-hosted hydrothermal systems on the mid-Atlantic ridge. In *Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges*, P.A. Rona, C.W. Devey, J. Dymont, B.J. Murton (eds), Geophysical Monograph Series, **2010**, 188, p. 265-296. (Résultats des programmes d'études des dorsales médio-océaniques menés par l'IFREMER dans le cadre des programmes européens MAST I-Marflux/ATJ et MAST II-Amores, et plus récemment des campagnes MomarDream (2007-2008) et Serpentine (2007)).

[6] V.N. Larin, *Hydridic Earth: The New Geology of our Primordially Hydrogen-rich Planet*, Polar Publishing, **1993**.

[7] H. Toulhoat, V. Zgonnik, Chemical differentiation of planets: a core issue, *Astrophys. J. Lett.*, **2022**, 924(2), p. 83-101.

[8] H. Toulhoat, V. Zgonnik, L'hydrogène primordial, *Géologues*, **2022**, 213, p. 58-63. (Ce numéro spécial de la revue de la Société Géologique de France présente en outre un panorama complet des recherches en cours actuellement en France sur le sujet).

[9] A. Prinzhofer *et al.*, Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins: the example of a Brazilian H_2 -emitting structure, *Int. J. Hydrog. Energy*, **2019**, 44, p. 5676-85.

[10] E. Frery, L. Langhi, M. Maison, I. Moretti, Natural hydrogen seeps identified in the North Perth Basin, Western Australia, *Int. J. Hydrog. Energy*, **2021**, 46, p. 31158-173.

Hervé TOULHOAT,

Collaborateur émérite, Laboratoire de Réactivité de Surface (LRS, UMR CNRS 7197), Sorbonne Université, Faculté des Sciences et Ingénierie, Paris.

* herve.toulhoat@orange.fr