REE REVUE DE L'ÉLECTRICITÉ ET DE L'ÉLECTRONIQUE
ARTICLE EXTRAIT DE LA REE 2023-4, TOUS DROITS RESERVES

Découverte d'hydrogène naturel dans le sous-sol lorrain

Un énorme gisement d'hydrogène naturel a été découvert en mai 2023 en Meurthe-et-Moselle, dans l'ancien bassin minier de Folschviller. C'est la plus grosse réserve d'hydrogène naturel trouvée à ce jour dans le monde.

Le site minier

L'hydrogène détecté est à l'état dissous dans l'aquifère, roche réservoir originellement poreuse ou fissurée contenant une nappe d'eau souterraine. Cette découverte s'inscrit dans le cadre du projet de recherche Regalor mené en collaboration avec l'Université de Lorraine et le CNRS. Ces recherches ont mis en évidence que les fluides des formations carbonifères du bassin minier lorrain sont très significativement enrichis en hydrogène, avec une concentration mesurée de 15 % à 1 000 mètres de profondeur et estimée à 98 % à 3 000 mètres.

Figure 1 : Bassin minier de Folschviller, en Lorraine.

Le potentiel du gisement lorrain

Les premières estimations font état d'un volume potentiel de 46 millions de tonnes, ce qui correspondrait à plus de la moitié de la production annuelle mondiale d'hydrogène issue d'énergie fossile. Sachant que la capacité énergétique d'une tonne d'hydrogène équivaut à celle de trois tonnes de pétrole, ce gisement pourrait représenter l'équivalent de 200 milliards de litres d'essence, soit la consommation française d'environ quatre années de carburants fossiles (essence et diesel).

De nouvelles campagnes de mesure vont être menées par la compagnie Française d'Energie (FDE) pour évaluer plus précisément le potentiel d'exploitation de cette source naturelle d'hydrogène. Cette compagnie a déposé une demande d'octroi de permis exclusif de recherches de mines dit « Permis des Trois-Évêchés » pour l'exploration de l'hydrogène naturel dans le bassin minier lorrain.

Le bassin minier concerné s'étend sur une superficie de 2 254 km², localisé dans les départements de la Moselle et de la Meurthe-et-Moselle.

Un site pilote devrait ensuite être construit pour démarrer la production locale d'hydrogène naturel dans la région Grand Est. La compagnie FDE prévoit d'autres projets d'exploitation d'hydrogène naturel dans les régions de Wallonie, de la Sarre, de Rhénanie-Palatinat et au Luxembourg.

Le code de couleurs de l'hydrogène

L'hydrogène naturel est aussi appelé « hydrogène blanc ». Il est directement disponible et ne nécessite pas de transformation issue de gaz ou de l'électrolyse. Il existe plusieurs voies d'approvisionnement d'hydrogène. On les classe par couleur selon le code suivant (figure 2) :

• **Blanc :** L'hydrogène blanc désigne un hydrogène extrait sous sa forme naturelle.

• **Noir :** Considéré comme l'hydrogène le plus émetteur en CO_2, l'hydrogène noir est produit à partir de charbon. Lui-même est converti en gaz avant d'être transformé en hydrogène.

• **Gris :** Aujourd'hui considéré comme le plus courant et le moins cher à produire, l'hydrogène gris est fabriqué à partir du vaporeformage du gaz, donc d'origine fossile.

• **Bleu :** Dérivé de l'hydrogène gris, l'hydrogène bleu s'en distingue par le fait que sa production est associée à un dispositif de captage et de stockage du CO_2 produit. Considéré comme un hydrogène « bas carbone », l'hydrogène bleu n'est pas pour autant 100 % propre car le captage consomme de l'énergie.

• **Rose :** L'hydrogène rose est produit à partir d'électricité d'origine nucléaire grâce à l'électrolyse de l'eau.

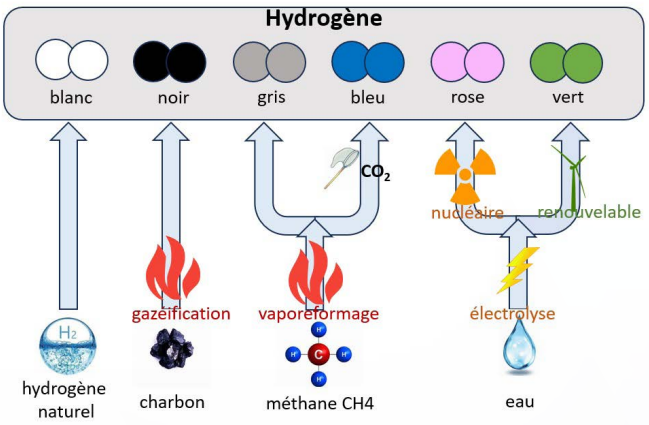

Figure 2 : Code de couleurs de l'hydrogène.

• **Vert :** Également produit par électrolyse de l'eau, l'hydrogène vert est obtenu à partir d'électricité d'origine renouvelable.

La présence d'hydrogène blanc

Certains processus naturels, présents dans la croûte terrestre et dans les sous-sols de la planète, génèrent directement de l'hydrogène pur. C'est ainsi qu'est produit ledit « hydrogène blanc ». Cet hydrogène n'avait, jusqu'à présent, pas suscité un intérêt justifiant des travaux de recherche approfondis.

La découverte du premier gisement « d'hydrogène blanc » a été faite de façon fortuite il y a quelques années au Mali, à Bourakébougou situé à 60 kilomètres de Bamako dans un trou profond de 100 mètres. L'exploitation de cette source d'énergie permet l'alimentation électrique de tout le village. Cette découverte a suscité la curiosité de la communauté scientifique. Selon les géologues, au-delà du cas malien, de potentielles sources d'hydrogène seraient présentes le long des failles océaniques, dans les zones riches en fer ou dans certaines zones montagneuses. Certains scientifiques pensent même qu'il y aurait assez de réserves pour subvenir aux besoins de tous les habitants de la Terre.

Depuis, d'autres réserves d'hydrogène naturel ont été détectées dans les sous-sols des États-Unis, d'Australie. Des gisements sont à l'étude en Espagne, en Chine et en Finlande. En France, en dehors du site lorrain, des sources d'hydrogène blanc ont aussi été détectées dans les Pyrénées-Atlantiques, dans la Drôme, la Côte-d'Or ou encore le Cotentin.

Nous ne sommes donc qu'au début de la recherche d'hydrogène blanc. On ne connaît pas encore le coût financier et le coût écologique de l'exploitation de ces gisements. L'exploitation du site lorrain devrait permettre à la France d'acquérir l'expérience nécessaire pour mieux évaluer le potentiel de cette solution prometteuse en remplacement des énergies fossiles. ■ **GS**

La fusion nucléaire par contrat en 2028 ?

Quand une start-up annonce une solution pour exploiter la fusion nucléaire dès 2028, il y a de quoi être surpris. Alors faisons le point…

Eléments de contexte

Nous avons déjà évoqué à plusieurs reprises les recherches sur la fusion nucléaire. A l'international, les recherches sur l'énergie de fusion se structurent depuis des décennies autour de plusieurs grands projets expérimentaux et aussi, depuis moins longtemps, et de manière étonnante, à partir de startups ou d'entreprises privées qui développent des projets innovants se positionnant en concurrence avec les grands programmes. En effet, il existe plus d'une trentaine d'entreprises qui travaillent sur la fusion nucléaire à partir de financements issus d'investissement privés. Cet intérêt peut s'expliquer par les progrès relativement récents dans la science des matériaux, associés aux puissances de calcul des ordinateurs qui permettent des approches alternatives aux grands projets nationaux et internationaux. L'une des startups de ce domaine, Helion Energy, créée en 2013, a développé une solution inédite en combinant certains aspects des confinements magnétique et inertiel. Nous allons rappeler ces deux procédés actuels de réalisation de la fusion nucléaire contrôlée.

Le confinement magnétique

Ce procédé consiste à créer un plasma dans un tore appelé Tokamak, confiné par un champ magnétique puissant. Le plasma constitué de deutérium ou de tritium doit, à partir d'une température de plusieurs millions de degrés, déclencher une fusion contrôlée des isotopes de l'hydrogène afin de produire plus d'énergie que celle qui permet le fonctionnement de l'ensemble. Le confinement magnétique requiert de très grosses installations à l'image du programme international hébergé en France, ITER, et le gigantisme des Tokamak n'offre guère de possibilités de développement à des startups.

La fusion par confinement inertiel

Le principe du confinement dans cette configuration, consiste à faire imploser une capsule sphérique contenant un mélange de deutérium et de tritium. Pour déclencher la fusion, la capsule est soumise à un rayonnement très intense, sa paroi externe se transforme en plasma avec la température élevée ; ceci entraîne l'implosion de la capsule et la compression du mélange deutérium-tritium. Si la fusion se réalise, l'énergie thermonucléaire se dégage avant que la capsule ne se désagrège. Cette méthode qui ne demande pas de grandes structures telles que les Tokomak est celle privilégiée par les startups. Il faut noter également que les rayonnements utilisés sont obtenus par des lasers de forte puissance et que le confinement inertiel a été utilisé depuis longtemps pour la simulation des bombes atomiques ; le programme Laser Mégajoule, en France, en est une illustration. La recherche par confinement inertiel a de ce fait hérité des techniques et du savoir-faire des installations de simulation.

La firme Helion Energy

Helion Energy Inc. est une société américaine fondée en 2013 dont l'objet d'étude est la fusion nucléaire. Les fondateurs d'Helion Energy défendent l'idée que la fusion n'est pas un problème de physique fondamentale, mais un problème d'ingénierie qui sera résolu en construisant, en testant et en optimisant des systèmes et sous-systèmes de fusion. Avec l'objectif d'obtenir une électricité propre, sûre et abondante, ils abordent la fusion sous un nouvel angle. Cette nouvelle approche repose sur les trois points suivants : ●●●

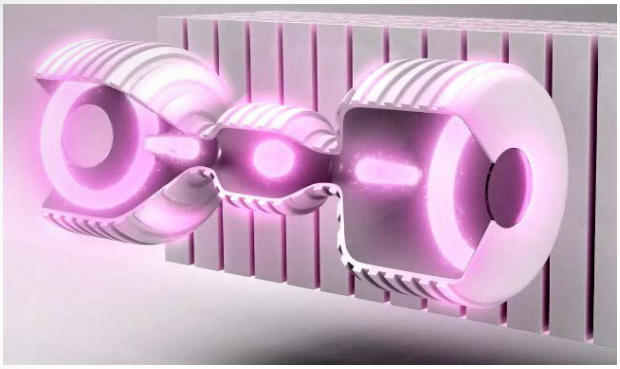

Figure 1 : Vue d'artiste du réacteur imaginé par Helion Energy (source Helion Energy).

• Hélion utilise un système de fusion pulsée sans allumage. Cela permet le développement d'appareils très économes en énergie et d'ajuster la puissance de sortie en fonction des besoins par réglage de la fréquence d'impulsion.

• Le réacteur est construit pour collecter directement l'électricité et est conçu pour récupérer efficacement toute l'énergie électromagnétique inutilisée. Les autres systèmes de fusion chauffent l'eau pour créer de la vapeur qui fait tourner une turbine, avec beaucoup d'énergie perdue au cours du processus. Il y a donc un gain en rendement important.

• Le combustible utilisé est constitué de deutérium et d'hélium-3. La fusion deutérium-hélium-3 donne naissance à des particules chargées qui peuvent être directement captées sous forme d'électricité. Cela implique une construction plus rapide à un moindre coût. Le cycle du combustible minimise également les émissions de neutrons, (émissions dite aneutroniques) réduisant ainsi considérablement un grand nombre de défis techniques auxquels sont confrontés les utilisateurs de combustible de fusion deutérium-tritium.

Hélion Energy a achevé un 6ème prototype, Trenta, en 2019. Pendant deux ans, Trenta a fonctionné presque tous les jours en obtenant la fusion du combustible. Il a effectué 10 000 impulsions de haute puissance et a fonctionné sous vide pendant 16 mois. Avec Trenta, Helion est devenue la première organisation privée à atteindre une température de plasma de 100 millions de degrés Celsius. Après des campagnes de tests réussies, Helion a arrêté d'exploiter Trenta, en janvier 2023, pour se concentrer sur la construction d'un 7ème prototype de fusion, Polaris.

Les financements

Peu après sa création Helion a reçu 7 millions de dollars de la NASA, du département *Energy* des Etats-Unis, du ministère de la défense et 1,5 million de dollars de fonds privés par l'intermédiaire d'incubateurs d'entreprises. En 2021, ces financements s'élevaient à 77,8 millions de dollars. En novembre 2021, Helion Energy a reçu 500 millions de dollars pour son nouveau réacteur et des engagements à hauteur de 1,7 milliard de dollars pour la réalisation d'un programme à étapes échelonnées dans le temps, pour le développement de la fusion nucléaire contrôlée.

L'accord avec Microsoft

En mai 2023, Microsoft a signé un accord avec Helion Energy pour exploiter à partir de 2028 un réacteur à fusion pour la production d'électricité. D'après le PDG d'Helion Energy, il s'agit d'un accord contraignant prévoyant des pénalités financières si le contrat n'était pas honoré. Pour Microsoft, cet accord a été conclu dans le cadre des engagements climatiques du géant de l'informatique qui souhaite produire et consommer de l'énergie propre.

Si cet accord était respecté, ce serait une révolution considérable du domaine car, jusqu'à présent, aucun des grands programmes consacrés à la production d'énergie par fusion nucléaire ne tient un tel délai. Cela témoignerait d'un développement plus rapide que ceux effectués dans le cadre des institutions étatiques. ■ **ML**

Piratage d'un satellite : une démonstration en guise de première mondiale

L'évènement a eu un fort retentissement dans les milieux de l'ingénierie spatiale, peut-être moins auprès du grand public. Une équipe de quatre chercheurs en cybersécurité du groupe Thalès a pris le contrôle d'un satellite de l'Agence spatiale européenne (ESA). Pour la bonne cause, évidemment…

Le contexte de l'évènement

La troisième édition du CYSAT, grand salon européen consacré à la cybersécurité dans l'industrie spatiale, s'est déroulée à Paris, les 26 et 27 avril 2023. Dans le contexte de cet évènement, l'ESA avait proposé un défi aux experts en cybersécurité de l'écosystème spatial.

La cible était le nano satellite OPS-SAT, lancé en 2018, et servant à des expérimentations. Il s'agit d'un petit bijou de technologie de 30 cm de haut et pesant à peine 10 kg dont le centre de contrôle se trouve en Allemagne. Ce satellite passe deux à trois fois par jour au-dessus de ce centre de contrôle ce qui permet de communiquer avec lui.

Pour la démonstration réalisée le 27 avril au CYSAT, l'ESA a organisé sur le banc représentatif du satellite une simulation de prise de contrôle à distance du satellite OPS-SAT. L'équipe de cybersécurité offensive de Thalès, constituée de quatre chercheurs, a été la seule à relever le challenge en identifiant des vulnérabilités permettant de perturber le fonctionnement du satellite. La vidéo

Figure 1 : Vue d'artiste du satellite OPS-SAT. Source : ESA.

complète, qui dure environ une heure, de la présentation réalisée lors de la conférence CYSAT est disponible en ligne [1].

Le piratage

Les quatre chercheurs de Thalès travaillaient depuis février 2022 sur cette action de piratage éthique. Ils sont parvenus à s'introduire dans le système de bord du satellite. Après avoir pris la main sur l'environnement applicatif au travers de droits d'accès standards, ils ont réussi à introduire un code malveillant en exploitant plusieurs vulnérabilités. Cela leur a permis de compromettre les données retransmises vers la Terre, notamment en modifiant les images captées par le satellite. Ils ont également réussi à atteindre d'autres objectifs comme le masquage de certaines zones géographiques sur les prises de vue satellitaires tout en dissimulant leurs activités de l'organisation ESA. Toutes ces manipulations, réalisées dans le cadre de démonstrations pour l'événement du CYSAT, démontrent les

1 https://www.youtube.com/watch?v=sXGQWLJ8904

Figure 2 : Les quatre chercheurs lors de la présentation au CYSAT. Source : Thalès et photo publiée dans Ouest-France [2].

impacts majeurs que peut avoir une cyberattaque réelle sur le monde civil.

Cet exercice unique a été réalisé avec le support du CESTI [3], le Centre d'évaluation de la sécurité des technologies de l'information du Groupe ; il démontre la nécessité d'une cyber résilience avancée, appliquée à l'environnement très spécifique des satellites. « *Le piratage de satellites n'est plus de l'ordre de la science-fiction* », assure Lionel Salmon, directeur cybersécurité des systèmes spatiaux de Thales. « *C'est devenu un véritable enjeu de sécurité. Imaginons des hackers capables de modifier les images prises par un satellite militaire. Qu'ils effacent la présence d'armées ou d'armes et faussent les renseignements ? D'où l'intérêt de prendre en compte ce risque et d'y trouver des solutions.* »

Utilisant les données des « pirates », l'agence spatiale européenne a comblé les failles de sécurité de son satellite. Notons toutefois que durant ces manœuvres de démonstration, l'ESA a toujours gardé un accès aux commandes du satellite afin d'assurer le contrôle et retour à la normale.

L'activité de cybersécurité de Thales dans le domaine spatial

Combinant plus de quarante ans d'expérience dans le domaine de la cybersécurité et des activités spatiales, Thales propose à ses clients, opérateurs de satellites et agences spatiales, des produits *cybersecurity by design*. Sa co-entreprise avec Leonardo, Thales Alenia Space, conçoit et délivre des solutions innovantes pour les télécommunications, la navigation, l'observation de la Terre et la gestion de l'environnement, l'exploration, les sciences et les infrastructures orbitales. Disposant de plus de 3500 experts en cybersécurité, Thales contribue à la sécurité de programmes satellitaires tant dans le cadre national, européen - en particulier pour le programme européen de navigation par satellite Galileo - ainsi qu'à l'international. L'expertise dans la fourniture de systèmes satellitaires de pointe et la garantie d'une cybersécurité bénéficiant des dernières avancées technologiques sur des systèmes militaires permettent de proposer aux gouvernements, aux institutions et aux entreprises une offre globale de cybersécurité robuste pour protéger l'ensemble des segments du système spatial. L'expertise en sécurité offensive dont Thales a fait la démonstration au CYSAT permet d'anticiper et répondre au mieux aux menaces actuelles et à venir. Le Groupe assure ainsi des missions d'analyse de la menace, de protection des données et des réseaux, de détection et de réponse à incident, ainsi que de maintien en condition de sécurité dans le temps. ■ **JC**

2 https://www.ouest-france.fr/societe/cyberattaque/des-hackers-bretons-ont-reussi-a-pirater-un-satellite-tournant-a-500-km-autour-de-la-terre-23961b6a-e5d2-11ed-a421-d61b66109416.

3 Les CESTI sont des laboratoires qui réalisent les évaluations de sécurité de produits. Ils agissent en tant que tierce partie de confiance, indépendante des développeurs et des commanditaires, et doivent être agréés par l'organisme de certification national, l'ANSSI en France.