ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES
POUR UN PROGRÈS RAISONNÉ, CHOISI ET PARTAGÉ

HYDROGÈNE NATUREL

Isabelle Moretti
Membre de l'Académie des technologies

Séance du 10 avril 2024

Résumé

Alors que plus de 95% de l'hydrogène consommé mondialement est manufacturé à partir des hydrocarbures et notamment du charbon, la demande pour de l'hydrogène décarboné est actuellement très forte. L'utilisation de l'hydrogène naturel est une des solutions envisagées. Après avoir fait l'objet de beaucoup de scepticisme, elle suscite de plus en plus d'intérêt et les connaissances sur le sujet progressent parallèlement au démarrage de cette industrie.

La société Hydroma, implantée au Mali, a été pionnière dans ce domaine, grâce à la découverte fortuite d'une émanation d'hydrogène dans un forage d'eau.

En France, la startup 45-8 Energy se consacre à l'exploration et à la production d'hydrogène naturel et d'hélium, deux gaz souvent réunis dans les mêmes réservoirs, et privilégie la valorisation locale de ces produits afin d'économiser sur le prix de transport et de réduire l'impact carbone.

Enfin, IFPEN, qui est en train d'effectuer sa transition vers les énergies vertes, met désormais les outils numériques ou expérimentaux développés dans le cadre de l'exploration pétrolière et gazière au service de l'exploration de l'hydrogène.

Intervenants

Asma DIALLO
Directrice scientifique d'Hydroma

Nicolas PÉLISSIER
Président co-fondateur de 45-8 Energy

Yannick PEYSSON
Responsable de programmes R&D chez IFPEN

Sommaire

Pourquoi trouve-t-on de l'hydrogène dans le sous-sol ? 2
L'aventure d'Hydroma et le marché mondial de l'hydrogène naturel 3
Hélium et hydrogène naturel : 45-8 Energy, une startup française 5
Le développement et l'adaptation d'outils pour l'exploration de l'hydrogène naturel 8
Débats 9

Pourquoi trouve-t-on de l'hydrogène dans le sous-sol ?

Isabelle Moretti

Depuis les années 1980, de nombreuses émanations d'hydrogène ont été identifiées à travers le monde. Les scientifiques s'y intéressaient essentiellement pour comprendre les origines de la vie. Les « fumeurs noirs », des cheminées hydrothermales que l'on trouve sur l'axe des dorsales océaniques et qui rejettent 50 à 70 % d'hydrogène, représentent en effet de véritables oasis de vie au fond des océans (figure 1).

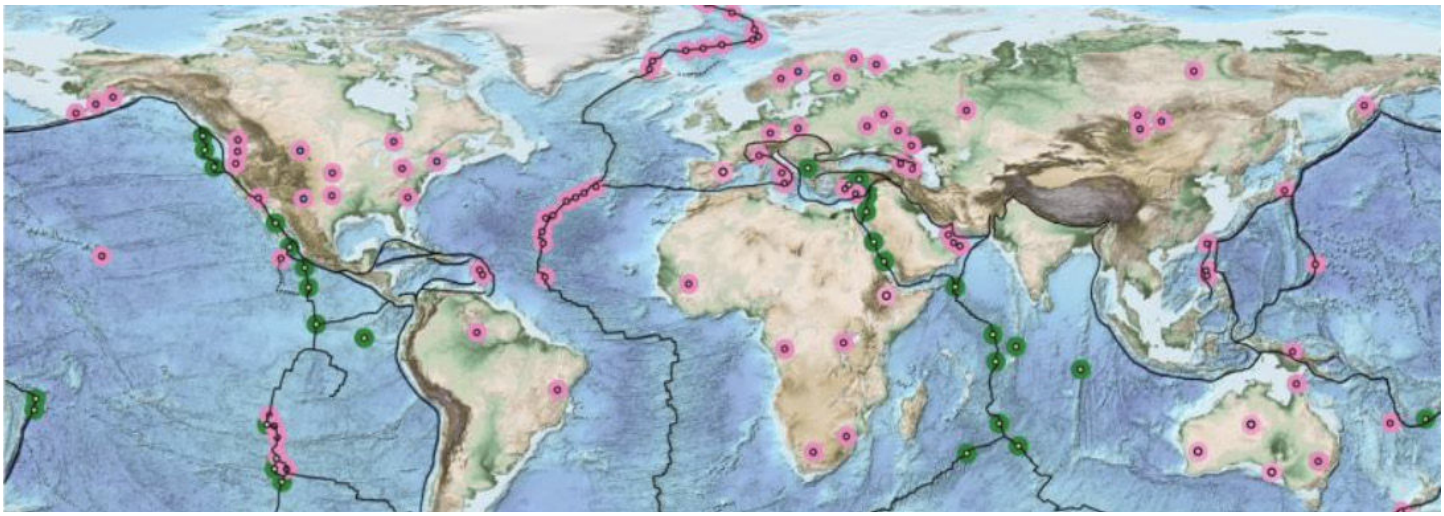


figure 1

En revanche, ces émanations ne paraissaient pas exploitables et n'étaient donc pas considérées comme une ressource potentielle. Depuis quelques années, on s'est rendu compte que des émanations pouvaient également se produire à terre, ce qui change la donne sur le plan à la fois technique et économique.

D'où provient l'hydrogène naturel ?

L'hydrogène naturel provient pour partie de la mise en contact de roches issues du manteau terrestre soit avec de l'eau de mer, comme au niveau des dorsales océaniques, soit avec de l'eau de pluie, comme dans le rift africain ou en Islande. Au contact de l'eau, ces roches s'oxydent et génèrent de l'hydrogène, selon le phénomène de la serpentinisation. L'hydrogène peut aussi apparaître dans des régions où d'anciennes croûtes océaniques se retrouvent assez proches de la surface pour être en contact avec de l'eau, par exemple lors des phénomènes de compression (Oman, Nouvelle-Calédonie…).

Des roches riches en ions métalliques comme le fer, situées sur des portions très anciennes de la croûte continentale et mises en place à l'époque où l'atmosphère terrestre comprenait peu d'oxygène, peuvent également générer de l'H_2 à travers des phénomènes d'oxydoréduction. On en trouve notamment en Australie, en Russie, aux États-Unis ou au Brésil.

Un autre processus de production de l'hydrogène naturel est la radiolyse, c'est-à-dire la radioactivité naturelle des roches, qui peut casser les molécules d'eau situées à proximité et libérer l'hydrogène.

Un dernier processus est la maturation tardive des roches mères. Chacun sait que lorsque l'on chauffe du charbon, celui-ci produit du gaz de ville, composé à 50 % d'hydrogène. Ce processus peut être obtenu artificiellement en quelques minutes, à très haute température. Sous terre, à basse température, il nécessite plusieurs millions d'années.

On ignore, à l'heure actuelle, quelle est la réaction dominante par rapport à toutes celles qui ont été identifiées.

Une ressource naturelle peu coûteuse et propre

On a cru très longtemps que l'hydrogène, extrêmement volatile, ne pouvait être arrêté par aucune roche et ne pouvait donc pas s'accumuler dans le sol. Des découvertes fortuites, comme il s'en est produit au Mali alors que les foreurs cherchaient de l'eau, ont démontré que l'hydrogène naturel pouvait effectivement s'accumuler dans le sous-sol et faire l'objet d'une exploitation. En quelques années, la production d'hydrogène naturel est ainsi passée du statut de curiosité géologique à celui de nouvelle ressource naturelle décarbonée et potentiellement renouvelable.

En plaçant un peu de poudre de roche et d'eau dans des capsules en or et en disposant celles-ci dans des autoclaves, où elles sont chauffées à diverses températures pendant plusieurs semaines, nous avons pu établir que, pour les roches océaniques et mantéliques, la génération d'hydrogène se produit entre 250 à 300 °C mais que, pour les roches continentales, celle-ci peut s'opérer dès 80 °C. En d'autres termes, si de l'eau de pluie s'infiltre à 3 000 ou 4 000 mètres de profondeur, elle peut interagir avec ces roches et générer à nouveau de l'hydrogène.

L'engouement pour l'hydrogène naturel est d'autant plus fort que la production d'hydrogène par électrolyse ou par vaporeformage consomme beaucoup d'énergie, la deuxième méthode ayant aussi l'inconvénient de rejeter du CO_2. Par comparaison, la production d'hydrogène naturel est à la fois moins coûteuse et plus propre.

Une accélération mondiale

Depuis les expériences pionnières réalisées au Mali et en Australie, on observe une accélération des investissements, notamment en Australie et aux États-Unis. L'Australie a commencé à accorder des permis et deux puits ont d'ores et déjà été forés, à cent mètres d'un ancien puits pétrolier où l'on avait trouvé de l'hydrogène il y a un siècle. Les États-Unis sont très discrets sur leurs découvertes mais, compte tenu des fonds levés, notamment, par la compagnie Koloma (80 millions de dollars en 2023, puis 245 millions de dollars en 2024), on peut faire l'hypothèse que des gisements importants ont été mis au jour.

En France, de premières licences d'exploitation ont été accordées à des projets portés essentiellement par des startups. À l'exception notoire d'Engie, via sa filiale Storengy, les grandes compagnies se montrent encore circonspectes.

Dans les Pyrénées, des roches mantéliques situées à 10 kilomètres de profondeur et se trouvant désormais en contact avec de l'eau génèrent de l'hydrogène qui remonte à travers des failles. Tout l'enjeu est de découvrir s'il existe, dans cette zone, des accumulations exploitables. La société TB-H_2 a obtenu un premier permis et elle est en train d'acquérir des données géographiques pour déterminer les zones où forer.

En Lorraine, une équipe du CNRS a réalisé des analyses dans des puits appartenant à La Française de l'Énergie et contenant à la fois des roches riches en fer et du charbon. En utilisant une membrane qui permet de mesurer le gaz dissous dans l'eau, elle trouvé un peu d'hydrogène à faible profondeur, et davantage (jusqu'à 15%) à des profondeurs plus importantes, la solubilité de l'hydrogène augmentant avec la pression. La presse a d'ores et déjà annoncé la découverte d'un gisement de plusieurs millions de tonnes, mais c'est seulement lorsque le permis aura été obtenu et que la compagnie commencera à forer que l'on pourra vérifier ce qu'il en est.

L'aventure d'Hydroma et le marché mondial de l'hydrogène naturel

Asma Diallo

Hydroma est une société canadienne fondée par un entrepreneur malien, Aliou Diallo. En 2010, alors qu'elle menait une campagne d'exploration d'hydrocarbures au nord-ouest de Bamako, elle a pris connaissance d'un incident survenu une vingtaine d'années plus tôt sur un forage d'eau dans le village de Bourakèbougou, situé dans cette zone. L'un des puits forés s'était avéré sec mais, lorsque le foreur avait allumé une cigarette, il avait provoqué une explosion. Devant la peur suscitée par cet incident, le puits avait été colmaté. Intrigués, nous avons rouvert le puits et découvert qu'il s'en dégageait du gaz composé à 98% d'hydrogène.

L'origine de l'hydrogène présent à Bourakèbougou

À l'époque, nous nous sommes heurtés au scepticisme de la communauté académique. Personne ne voulait croire qu'il existait de l'hydrogène à l'état naturel et que celui-ci pouvait être utilisé comme une source d'énergie primaire.

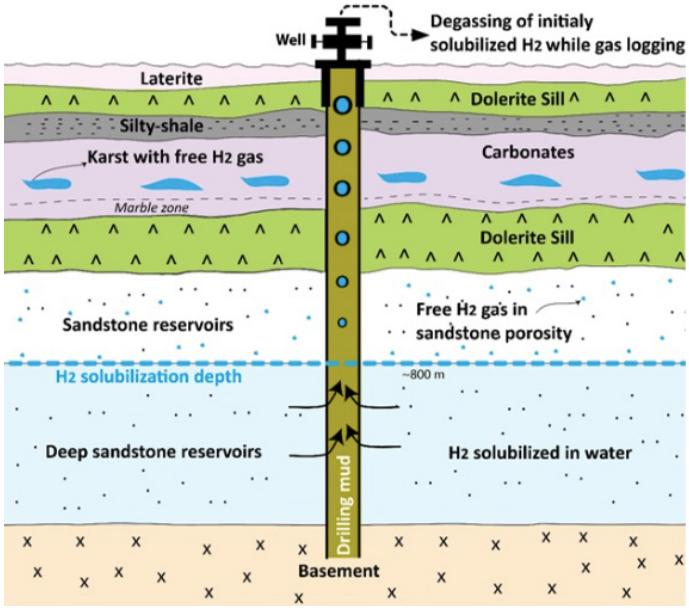


figure 2

À partir de 2011, nous avons mené plusieurs campagnes de mesures géologiques, géophysiques et géochimiques sur le terrain (figure 2). En dix ans, malgré la situation politique et sécuritaire très instable que connaît le Mali depuis 2012, nous avons foré plus d'une trentaine de puits, à des profondeurs allant de 100 mètres à 2 400 mètres. Grâce à une thèse menée en partenariat avec l'IFPEN, nous disposons aujourd'hui d'une bonne connaissance des différentes couches géologiques et des réservoirs d'hydrogène naturel.

Plusieurs accumulations protégées par des couches de dolérite sont présentes dans les couches de carbonate ou de sables. Elles sont principalement issues du processus d'oxydoréduction évoqué par Isabelle Moretti.

Quantifier la ressource

À l'heure actuelle, il n'existe pas de standard pour quantifier les ressources d'hydrogène naturel. En recourant aux standards canadiens NI 51-101 d'évaluation des ressources dans l'exploration du gaz conventionnel, nous sommes parvenus à une estimation selon laquelle les réserves d'hydrogène du Mali pourraient représenter 670 milliards de mètres cubes, ce qui est colossal.

Un coût d'exploitation très faible

Sachant que la première accumulation est située à une profondeur d'environ 100 mètres, alors que l'industrie pétrolière et gazière opère fréquemment à des profondeurs de 2 000 ou 3 000 mètres, l'hydrogène malien s'annonce très compétitif. C'est d'autant plus vrai que sa concentration est de 98 %, à comparer avec les 15 % de concentration de l'hydrogène trouvé en Lorraine, par exemple. Les 2 % restant sont composés d'hélium et de méthane. Ce gaz peut ainsi être utilisé directement en combustion et, pour les autres applications nécessitant de l'hydrogène pur, les coûts de traitement seront marginaux.

À l'échelle mondiale, le coût de l'hydrogène naturel est estimé à 1 ou 2 euros/kilogramme, selon la profondeur du forage, prix que l'hydrogène vert ne devrait atteindre qu'à un horizon lointain, si tant est qu'il y parvienne. À ceci s'ajoute l'impact environnemental très faible de l'hydrogène naturel, par rapport aux autres types d'hydrogène.

L'hydrogène, un marché mondial très dynamique

Les applications envisageables pour l'hydrogène naturel sont les mêmes que pour l'hydrogène vert ou gris : production d'ammoniac mais également d'acier, raffinerie, production d'électricité décarbonée centralisée ou décentralisée, mobilité.

Ce marché est très dynamique. En 2022, on estime que la consommation mondiale a été de l'ordre de 95 millions de tonnes, majoritairement dans la raffinerie et la production d'ammoniaque. Elle connaît une croissance de 9 % par an et, s'agissant de l'hydrogène vert, on prévoit une croissance de 40 % par an dans les dix prochaines années. Selon les estimations de l'IEA (*International Energy Agency*), la consommation devrait être de 530 millions de tonnes d'hydrogène à l'horizon 2050. Malgré tous les développements envisagés pour l'hydrogène vert ou bleu, la production ne sera pas suffisante et celle de l'hydrogène naturel permettrait de la compléter.

Démontrer la valeur économique locale de l'hydrogène naturel

À Bourakèbougou, nous avons décidé de nous concentrer sur les accumulations situées à la plus faible profondeur et de mettre en place des projets pilotes nous permettant de dérisquer l'ensemble. L'objectif était d'identifier les meilleures technologies à mettre en œuvre avant d'envisager la construction d'installations à grande échelle.

En 2012, grâce à un moteur thermique rétrofité, nous avons pu produire de l'électricité par combustion directe et l'utiliser pour l'éclairage public du village de Bourakèbougou. Notre objectif n'était pas commercial.

Nous voulions simplement démontrer que, même dans un pays qui ne produit pas d'ammoniac et ne possède pas de raffineries, l'hydrogène naturel pouvait avoir une valeur économique, ne serait-ce qu'en contribuant à l'électrification de sites isolés.

En 2023, nous avons lancé un deuxième projet pilote, reposant sur l'utilisation d'une pile à combustible, qui a permis, pendant un an, d'approvisionner le village en électricité. Il est apparu que la combustion directe était une technologie plus appropriée car l'utilisation de la pile à combustible nécessite de recourir à un hydrogène pratiquement pur. Par ailleurs, elle suppose de remplacer la pile régulièrement, ce qui n'est pas compatible, d'un point de vue économique, avec une valorisation locale.

Les pistes de valorisation de l'hydrogène malien

En collaboration avec l'institut Fraunhofer, nous avons analysé les pistes de valorisation de l'hydrogène malien à l'international. Le choix du marché se fait en fonction de l'existence d'un besoin local et de la capacité à exporter le gaz pour approvisionner des marchés distants.

L'étude a montré que, dans le cas du Mali, le plus intéressant serait de construire un pipeline pour transporter l'hydrogène vers la côte où il pourrait être exporté sous forme d'ammoniaque. Toutefois, compte tenu de la situation politique et sécuritaire instable actuellement, l'étude préconise, dans un premier temps, de se concentrer sur la production d'électricité destinée au marché local et national, avec notamment l'approvisionnement de Bamako, située à une soixantaine de kilomètres.

Un game changer

Hydroma a joué un rôle de pionnier pour mettre en évidence l'existence de réservoirs d'hydrogène naturel. Aujourd'hui, les plus hautes autorités scientifiques communiquent sur l'intérêt de l'hydrogène comme source d'énergie primaire et de nombreuses compagnies se positionnent sur son exploration ou sa valorisation, ce dont nous ne pouvons que nous réjouir. Plus nous serons nombreux à investir et à collecter des données sur l'hydrogène naturel, plus cette filière pourra se développer. Par comparaison avec des électrolyseurs qui, en général, ne présentent pas une taille viable sur le plan commercial et peinent à produire les quantités d'électricité espérées, l'hydrogène naturel apparaît désormais comme susceptible de changer profondément la donne de la transition énergétique.

Hélium et hydrogène naturel : 45-8 Energy, une startup française

Nicolas Pélissier

La startup 45-8 Energy a été fondée à Metz il y a six ans et elle est dédiée à l'exploration et à la production d'hélium et d'hydrogène naturel en Europe – comme en témoigne le choix de son nom un peu énigmatique : 45,8 millions d'années est l'âge géologique du Lutétien, c'est-à-dire de la pierre de Paris, sur laquelle nous avons commencé à faire nos armes, et les chiffres de 45° de latitude et de 8° de longitude correspondent également au cœur géographique de l'Europe, dans laquelle, dès la création de notre société, nous avons souhaité nous ancrer. Notre équipe compte 33 personnes, essentiellement des docteurs et ingénieurs. Depuis le début de notre aventure, nous avons levé un peu plus de 32 millions d'euros et nous sommes en train de terminer un nouveau tour de table d'une quarantaine de millions d'euros supplémentaires.

Quel rapport entre hydrogène et hélium?

Dans les gisements de gaz, l'hélium est fréquemment combiné à l'hydrogène. La raison en demeure assez mystérieuse, mais deux hypothèses principales sont envisagées. Dans un contexte de radiolyse, la roche mère à l'origine de l'hydrogène est la même que pour l'hélium. Ainsi l'hydrogène servirait de vecteur à l'hélium et s'accumulerait avec ce dernier dans les réservoirs. Hors radiolyse, on peut imaginer un processus de migration tardive de l'hydrogène dans un réservoir où se trouveraient déjà de l'azote et de l'hélium, le premier ayant servi de vecteur au second ; l'hydrogène issu d'un phénomène plus tardif de serpentinisation, opérée en frange du bassin, convergerait vers le même piège et se retrouverait ainsi dans le même réservoir.

Historiquement, l'hélium a toujours été trouvé par hasard et en très petite quantité, généralement dans des gisements de gaz naturel. Lorsque le gisement était de très grande taille, cela justifiait de valoriser l'hélium, mais, comme les gisements de grande taille se font rares, il devient de plus en plus difficile d'accéder à cette ressource. Or, les besoins en hélium ne cessent de croître, que ce soit pour l'électronique de pointe, le médical, l'aéronautique ou encore le recyclage de matériaux stratégiques comme le titane.

Sachant que l'hélium ne peut pas être produit artificiellement, du moins dans des conditions économiquement viables, l'Union européenne, qui importe 100% de sa consommation, l'a classé parmi les ressources critiques. L'hélium consommé en Europe vient essentiellement des États-Unis, du Qatar, de l'Algérie et de la Russie. Alors que 74% des usages de l'hélium en Europe se font sous forme gazeuse, le transport sur longue distance s'effectue sous forme liquide, à -269 °C, ce qui consomme énormément d'énergie. Une fois liquéfié, l'hélium est placé dans des containers et la livraison n'est garantie que pendant quarante jours. Au-delà, par mesure de sécurité, une soupape s'ouvre et la partie d'hélium qui s'est regazéifiée est rejetée dans l'atmosphère. Ces différents éléments ainsi que de fortes tensions géopolitiques ont conduit à la flambée des prix de l'hélium : en cinq ans, son prix a été multiplié par trois.

Sur le plan commercial, exploiter à la fois de l'hélium et de l'hydrogène présente de nombreux avantages. La technologie d'exploitation de l'hélium étant plus mature, nous allons pouvoir commencer à produire de l'hélium dès 2026, ce qui contribuera à financer la poursuite de la R&D sur l'hydrogène. Le prix de l'hélium représentant trente à cent fois celui de l'hydrogène en fonction du conditionnement final, l'exploitation de l'hélium, même à des concentrations de 0,5 ou 1%, permettra de doubler la valeur du gisement d'hydrogène. Enfin, covaloriser les deux gaz en même temps aura pour effet d'abaisser les coûts de production de l'hydrogène naturel, puisque les deux gaz remonteront dans le même puits.

Le positionnement de 45-8 Energy

L'hydrogène naturel et l'hélium sont concentrés dans des zones géologiques qui ont été sous-explorées par l'industrie pétrolière. D'une part, les chromatographes utilisés par l'industrie pétrolière recourent à l'hydrogène comme gaz vecteur et n'identifient donc pas la présence d'hydrogène. D'autre part, l'hélium et l'hydrogène naturel sont souvent combinés avec de l'azote, un gaz non combustible, et lorsque celui-ci représentait une fraction importante de la ressource, les compagnies pétrolières préféraient renoncer à l'exploitation du gisement. L'une de nos activités fondamentales consiste à revisiter les données accumulées par l'industrie pétrolière, qui nous apportent des informations très intéressantes pour la recherche de gisements d'hydrogène et d'hélium.

Le deuxième pilier de notre positionnement consiste à nous concentrer sur une valorisation ultra locale de nos gisements. Ceci nous conduit à prendre en compte, au-delà des critères géo scientifiques, le contexte géopolitique, l'existence d'infrastructures, ou encore la proximité des clients, au point de retenir des projets éventuellement moins prometteurs sur le plan géologique mais répondant mieux à ces critères.

Enfin, plutôt que de liquéfier l'hélium ou l'hydrogène pour les transporter sur de grandes distances, nous privilégions des circuits très courts et la livraison en tube trailers ou pipelines, ce qui permet d'économiser sur les coûts de transport et de diviser par cinq l'impact carbone de la filière, comme dans le cas de la première production d'hélium en France, dans la Nièvre.

Les permis d'exploration déjà obtenus

Notre équipe travaille en permanence à identifier de nouvelles zones à explorer. À l'heure actuelle, 17 bassins ont été identifiés à l'échelle mondiale. Pour certains d'entre eux, nous avons déposé des demandes de permis d'exploration, voire obtenu ces permis et commencé à forer.

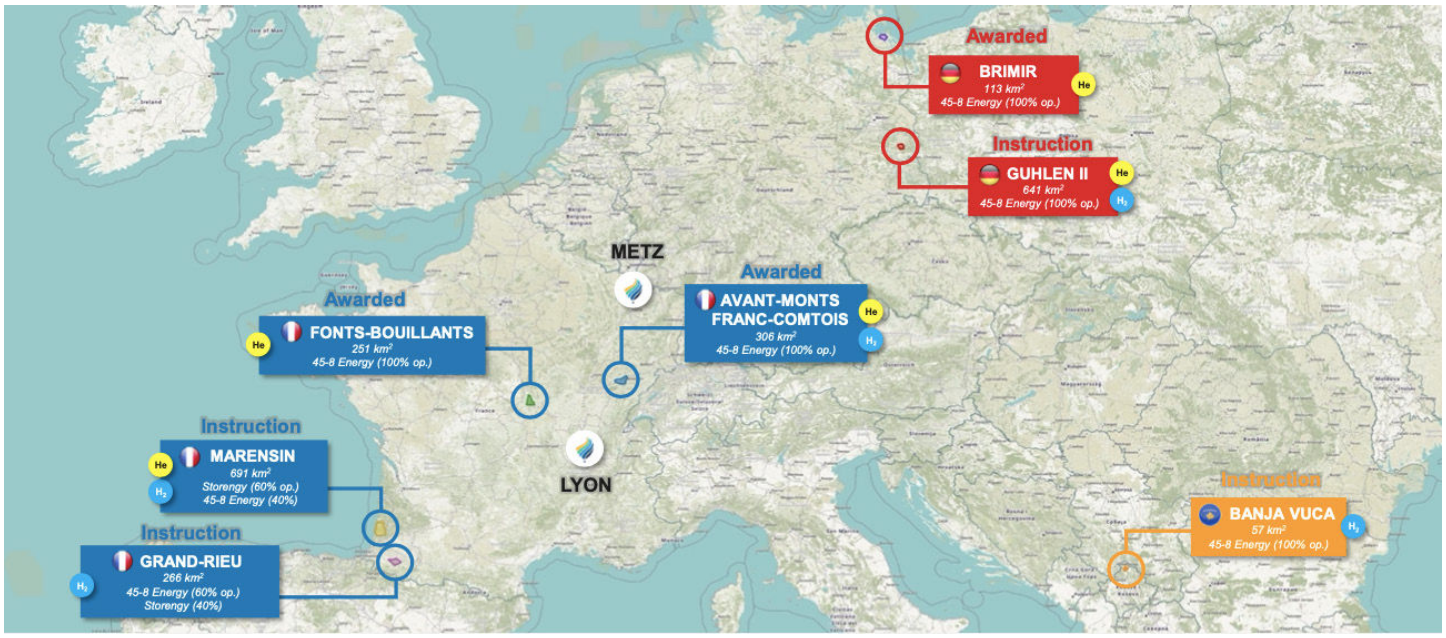


figure 3

En France, nous avons déjà obtenu deux permis, l'un à Fonts-Bouillants, dans la Nièvre, pour une surface de 251 km² comprenant 12 commues ; l'autre, dans les avant-monts francs-comtois, pour une surface de 306 km² comprenant 58 communes (figure 3). Dans les deux cas, il s'agit de rechercher de l'hélium, car l'hydrogène naturel n'a été intégré au code minier français qu'en avril 2022.

Deux demandes de permis, déposées conjointement avec Storengy, sont en cours d'instruction, l'une pour le site de Grand-Rieu dans les Pyrénées atlantiques (266 km²), l'autre pour le site de Marensin dans les Landes (691 km²). Ces projets ciblent principalement l'hydrogène naturel. Les indices que nous avons recueillis nous permettent d'espérer y trouver des réserves d'environ un ou deux millions de tonnes d'hydrogène.

Quatre autres opérateurs ont déposé des demandes de permis en France, Storengy (en partenariat avec 45-8 Energy), la Française de l'Énergie (en Lorraine), Terrensis (qui a obtenu un permis pour le site de Sauve Terre H_2, dans les Pyrénées atlantiques) et enfin SudMine, qui a déposé des demandes pour deux petites zones situées dans l'Ain et dans le Centre.

Nous avons, par ailleurs, obtenu un permis d'exploration en Allemagne, pour le site de Brimir (113 km²), où nous allons chercher de l'hélium. Par chance, pendant la période soviétique, la présence d'hélium était systématiquement mesurée. En l'occurrence, la concentration d'hélium est de 0,6%, ce qui peut paraître très faible mais, lorsque ce site produira de façon industrielle, il couvrira 20% des besoins allemands. Un autre permis est en cours d'instruction en Allemagne.

Enfin nous avons déposé une demande de permis au Kosovo, qui devrait nous être accordée d'ici l'été.

Les premières réalisations

Une seconde campagne de forages d'exploration est en cours dans la Nièvre. D'une profondeur de 1 400 mètres, les trois nouveaux puits sont réalisés par des unités de forage généralement utilisées pour des forages à eau. Plus accessibles financièrement, elles permettent de réaliser un puits au tarif de 500 000 euros, largement inférieur à celui d'un forage pétrolier, qui peut rapidement atteindre plusieurs millions d'euros. Pour les forages d'exploration de l'hydrogène très peu profonds, par exemple d'une centaine de mètres, le coût ne dépasse pas 20 000 à 30 000 euros.

Nous sommes également en train de terminer la construction d'une unité de production pilote dans la Nièvre. Ce sera la première unité de production d'hélium en Europe de l'Ouest, et c'est une première mondiale d'un point de vue technologique, avec un brevet co-déposé en partenariat avec le CNRS, qui permettra de commencer à générer du chiffre d'affaires dès l'été 2024.

Deux activités complémentaires

Nos travaux de R&D nous ont permis de lancer des activités complémentaires qui contribuent à notre capacité d'autofinancement de l'exploration.

La première, Recycl'He, est destinée à recueillir de l'hélium qui a été dégradé par son utilisation industrielle, à le purifier et à le revendre. Ce processus est opéré à l'aide d'une unité mobile. Nous allons, par exemple, recycler l'hélium contenu dans le ballon qui s'élève au-dessus du parc André Citroën et qui, sans cela, serait rejeté dans l'atmosphère après usage ou baisse de la portance, mais également l'hélium qui sera utilisé pour gonfler des dirigeables pendant les Jeux olympiques de Paris. Ceci permet de mettre en place une économie circulaire autour de cette ressource critique qui, à terme, pourrait permettre de recycler jusqu'à 25% de l'hélium consommé en Europe, soit la totalité de la consommation française annuelle.

Une autre de nos unités business, SurfMoG H_2, propose un détecteur d'émanations de gaz que nous avons commencé par développer pour notre propre usage. Il s'agit d'une sonde enfouie dans le sol et autonome pendant six mois, qui analyse les gaz présents une vingtaine de fois par jour et envoie les informations correspondantes via Internet.

Promouvoir l'hydrogène naturel en France et en Europe

La recherche académique française s'est fortement mobilisée autour de l'hydrogène naturel, au point qu'en 2022, les trois quarts des publications mondiales sur ce sujet étaient signées par des chercheurs français.

Nous sommes à l'origine, avec CVA et le pôle Avenia, de la création d'Earth$_2$, une initiative destinée à faire progresser les connaissances dans le domaine de l'hydrogène naturel, à promouvoir cette nouvelle source d'énergie au niveau français et européen et, enfin, à permettre aux acteurs de l'écosystème de l'hydrogène de mieux se connaître et de faire émerger des projets collaboratifs.

L'un des projets portés par d'Earth$_2$ est l'évaluation du potentiel en hydrogène naturel de la Nouvelle Aquitaine, menée en partenariat entre l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, le BRGM, Storengy et CVA. Aujourd'hui, une quarantaine d'acteurs ont rejoint Earth$_2$.

Le développement et l'adaptation d'outils pour l'exploration de l'hydrogène naturel

Yannick Peysson

IFP Énergies nouvelles (IFPEN), qui fête ses 80 ans en 2024, est un organisme public de recherche appliquée. Membre actif du réseau des 39 instituts Carnot, il intervient dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du transport, avec un champ d'action international. IFPEN a la particularité de disposer d'un centre de recherche et d'un centre de formation, mais aussi de piloter un groupe industriel avec des filiales telles qu'Axens, qui développe de nouveaux procédés dans les énergies alternatives et renouvelables, le raffinage, la pétrochimie, le gaz et produit un chiffre d'affaires de près d'un milliard d'euros avec 2 500 salariés ; ou encore BeicipFranlab, qui propose du conseil et des logiciels en géosciences.

La transition d'IFPEN vers les énergies vertes

Entre 2016 et 2023, la part des activités d'IFPEN consacrées aux hydrocarbures est passée de 62 à 25 % et celle des énergies vertes (parmi lesquelles l'hydrogène naturel) a progressé de façon inversement proportionnelle. Dans le domaine des géosciences, IFPEN cherche à mettre au service des nouveaux usages du sous-sol, comme l'exploration de l'hydrogène naturel, les outils et méthodes venus du secteur pétrolier et gazier.

IFPEN a piloté plusieurs thèses portant sur l'hydrogène naturel, avec des études de cas sur Oman, le Kansas, la Nouvelle Calédonie, le Mali (en collaboration avec Hydroma), ou encore Djibouti. Nous participons également à plusieurs initiatives destinées à structurer la recherche fondamentale sur l'hydrogène naturel, comme le GDR HydroGEMM ou le Natural Hydrogen Task lancé par l'IEA.

Avec notre filiale BeicipFranlab, nous avons défini un *workflow* géosciences pour l'exploration de l'hydrogène, destiné aux grands acteurs du secteur de l'énergie qui commencent à s'intéresser à l'hydrogène naturel. Nous leur proposons différents outils comme la modélisation de bassins, les campagnes de terrain, l'analyse des roches ou de prélèvements de gaz, la microbiologie, ou encore la modélisation de réservoir.

Les outils numériques

L'adaptation des outils numériques venus du secteur pétrolier et gazier est une part importante du travail R&D d'IFPEN. C'est le cas, par exemple, de la simulation de l'évolution des bassins au cours du temps. Cet outil intègre les processus de compaction qui jouent sur la porosité et la perméabilité des roches ; l'hydrodynamisme, qui influence les vitesses d'écoulement ; les transferts thermiques, qui créent les conditions de température et de pression nécessaires pour que la transformation des molécules s'opère ; ou encore le transport d'espèces, qui détermine la composition des fluides.

Nous avons ainsi procédé à la simulation d'un bassin de 142 kilomètres de long et de 7 000 mètres de profondeur, en étudiant particulièrement l'hydrodynamisme du bassin et la nature des failles (figure 4).

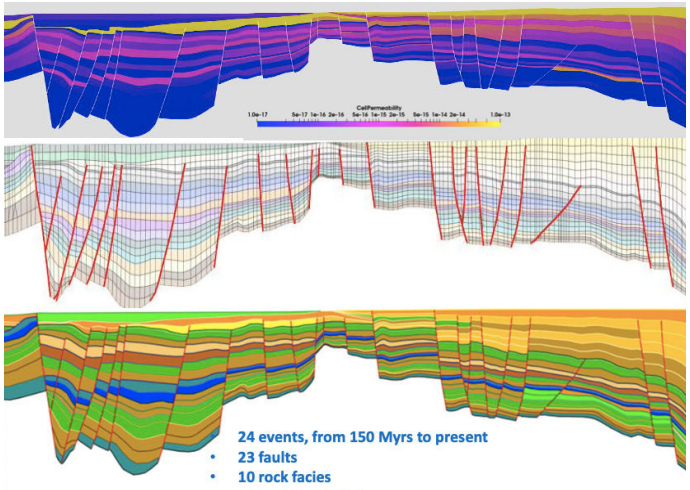


figure 4

Les acteurs de l'énergie peuvent s'en servir pour étudier différents scénarios de formation de l'hydrogène en profondeur, puis de remontée du gaz par certaines de ces failles vers des réservoirs. Nous travaillons à coupler cet outil à un module de chimie intégrant des méthodes de réseaux de neurones, pour prendre en compte les réactions d'oxydo-réduction de l'eau au contact des roches riches en fer. L'outil pourra alors prédire la présence d'hydrogène et sa répartition dans le bassin.

Nous cherchons également à faire évoluer les outils de modélisation de réservoirs en intégrant des processus géochimiques, les écoulements de Darcy à deux phases (phase aqueuse et gaz), ou encore la réactivité micro-biologique. En effet, l'hydrogène étant une sorte de « caviar » pour les micro-organismes, ceux-ci peuvent le consommer rapidement. Il est donc important d'intégrer la microbiologie pour évaluer le bilan global de production et de consommation d'hydrogène afin de bien simuler la dynamique globale d'un réservoir d'hydrogène.

Les outils expérimentaux

Certains laboratoires d'IFPEN sont directement utilisables pour les études liées à l'hydrogène naturel : analyse de gaz rares, chromatographie, analyse isotopique, géochimie, etc. D'autres doivent être adaptés, par exemple pour analyser l'activité microbienne en milieu poreux, ou encore pour étudier, dans des conditions réalistes, les écoulements d'hydrogène dans des carottes de roche représentatives, ce qu'on appelle des expériences en *core flood*.

Nous menons également des recherches pour anticiper les risques liés aux équipements de puits et de surface. Nous travaillons, par exemple, à mieux comprendre le risque de fragilisation des aciers par l'hydrogène, et nous étudions la dissolution et la perméabilité de l'hydrogène au travers des polymères.

Débats

L'acceptabilité des projets

Comment les villageois de Bourakèbougou, qui avaient été effrayés par la première explosion, ont-ils pu accepter le projet d'exploration de l'hydrogène ?

Asma Diallo : Les premières réactions n'étaient pas très favorables, mais nous avons effectué un travail important de pédagogie sur l'intérêt que pouvait présenter cette ressource pour le village, qu'il s'agisse de la production d'électricité grâce aux projets pilotes ou de la création d'emplois.

De son côté, comment 45-8 Energy s'assure-t-elle de l'acceptabilité de ses projets ?

Nicolas Pélissier : En tant qu'ancien de Total, je suis très sensible à ces questions ! Ayant constaté qu'au cours des quinze dernières années, tous les projets concernant le sous-sol menés en France, sans exception, ont capoté, nous avons recruté très tôt une directrice de la communication et décidé d'être extrêmement transparents vis-à-vis de la population et des associations.

Nous commençons à communiquer très en amont des projets, dès la phase d'instruction des demandes de permis, non seulement en distribuant des prospectus mais en tenant des stands sur les marchés ou lors des fêtes des villages. Nous allons également rencontrer un par un les propriétaires qui peuvent être concernés par les effets sismiques de nos forages.

Par ailleurs, nous nous efforçons de comprendre les besoins des habitants et d'y répondre. Plus que de redevances, ils ont envie de projets qui fassent sens. Dans la Nièvre, par exemple, la chaleur fatale que nous allons capter alimentera un séchoir à céréales l'hiver et une serre maraîchère pendant les autres saisons. Une partie des fruits et légumes produits sera destinée aux écoles et maisons de retraite locales.

Cela dit, lorsque nous approchons de la phase industrielle, nous proposons également systématiquement aux riverains d'investir dans le projet et d'en retirer ainsi un bénéficier financier direct.

Un risque de surproduction ?

Un grand nombre de projets d'électrolyseurs couplés à des centrales nucléaires ont déjà été lancés. L'arrivée de l'hydrogène naturel ne risque-t-elle pas de saturer le marché ?

Nicolas Pélissier : Les analystes établissent des projections qui s'avèrent souvent erronées. En l'occurrence, le nombre actuel d'électrolyseurs est très en-deçà du chiffre annoncé il y a deux ans. Par ailleurs, la France bénéficie de l'énergie nucléaire, mais celle-ci ne pourra pas être entièrement affectée à la production d'hydrogène. Si tous les camions européens devaient rouler à l'hydrogène, cela représenterait une consommation de 100 GW par an. Il faudra attendre très longtemps avant de parvenir à une telle production.

On peut néanmoins craindre que l'hydrogène naturel représente une concurrence très sérieuse pour l'hydrogène gris, et même vert.

Nicolas Pélissier : Chaque type d'hydrogène présente ses avantages et ses inconvénients. L'hydrogène naturel doit être purifié avant de pouvoir être utilisé dans une pile à combustible, contrairement à l'hydrogène produit par électrolyse, qui est très pur. L'hydrogène naturel pourra donc servir prioritairement pour des usages industriels. Par ailleurs, il sera très difficile de produire de l'hydrogène par électrolyse dans des régions non équipées de centrales nucléaires et, dans ce cas, l'hydrogène naturel pourra représenter une solution.

Isabelle Moretti : À l'heure actuelle, l'hydrogène est essentiellement gris et noir. Il reste de la place, à la fois pour l'hydrogène vert et pour l'hydrogène naturel…

Nicolas Pélissier : À supposer que la France produise plus que les 900 000 tonnes d'hydrogène dont elle a besoin aujourd'hui et que les 3 ou 4 millions de tonnes dont elle aura besoin dans quelques années, elle pourra l'exporter vers l'Allemagne, qui ne dispose ni d'énergie nucléaire, ni d'un sous-sol propice à l'hydrogène naturel, ou encore s'en servir pour produire et exporter de l'ammoniaque, ce qui améliorerait sa balance commerciale.

Mots-clés : Bourakèbougou, géosciences, gisement, hélium, hydrogène naturel, radiolyse, serpentinisation, simulation de bassin.

Citation :Isabelle Moretti, Asma Diallo, Nicolas Pélissier & Yannick Peysson. (2024). *Hydrogène naturel*. Les séances thématiques de l'Académie des technologies. @

Retrouvez les autres parutions des séances thématiques de l'Académie des technologies sur notre site

Académie des technologies. Le Ponant, 19 rue Leblanc, 75015 Paris. 01 53 85 44 44. academie-technologies.fr
Production du comité des travaux. Directeur de la publication : Patrick Pélata. Rédacteur en chef de la série : Hélène Louvel. Auteur : Élisabeth Bourguinat. n° ISSN : 2826-6196.

Les propos retranscrits ici ne constituent pas une position de l'Académie des technologies et ils ne relèvent pas, à sa connaissance, de liens d'intérêts. Chaque intervenant a validé la transcription de sa contribution, les autres participants (questions posées) ne sont pas cités nominativement pour favoriser la liberté des échanges.