

Stocker de l'hydrogène vert en masse pour décarboner l'énergie

HyPSTER, premier démonstrateur de stockage souterrain d'hydrogène en France

L'hydrogène vert, produit par électrolyse de l'eau, se distingue comme vecteur énergétique propre et facilement stockable en diverses quantités, se révélant comme une réponse-clé aux défis de la transition énergétique. Anticipant les futurs besoins en stockage d'énergie, divers acteurs des secteurs industriel et académique, spécialisés dans l'hydrogène et/ou dans le stockage souterrain de gaz, se sont unis pour développer en France un démonstrateur de stockage d'hydrogène en cavité saline : c'est le projet HyPSTER (*Hydrogen Pilot Storage for large Ecosystem Replication*).

L'hydrogène, considéré comme un vecteur énergétique, peut être produit, stocké, transporté et utilisé de diverses manières. Il existe plusieurs méthodes de production d'hydrogène, y compris à partir de charbon, de gaz naturel et par électrolyse de l'eau, chacune ayant un impact environnemental différent. Pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, la France a mis en place une stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène, axée sur la décarbonation de l'industrie, le développement de mobilités lourdes à l'hydrogène et le soutien à la recherche. L'hydrogène à des fins énergétiques devrait donc provenir de sources renouvelables et bas carbone. Pour compenser l'intermittence des énergies renouvelables, telles que solaires et éoliennes, l'hydrogène peut être stocké dans des cavités salines, des réservoirs déplétés, des aquifères ou des cavités minées revêtues. Le stockage souterrain permet de relier l'équipement de production au réseau de transport et de distribution. Les principaux défis pour un stockage d'hydrogène à grande échelle ou "en masse" en cavité saline incluent l'étanchéité du puits et de la cavité saline, la maîtrise du comportement du sel gemme et la thermodynamique de l'hydrogène (Bérest, 2021).

HyPSTER, le premier démonstrateur français de stockage d'hydrogène en cavité saline, est situé à Bresse Vallons dans l'Ain, sur le corridor européen nord-sud. Le territoire est dynamique pour le développement de l'hydrogène vert. Ce démonstrateur, élément-clé pour le développement de l'hydrogène bas carbone, pave la voie pour l'établissement d'une filière industrielle d'hydrogène vert et sa réplification technico-économique en Europe. Financé à hauteur de 5 millions d'euros sur 3 ans par l'Union européenne, sur un coût total de 15,5 millions d'euros



Hippolyte Djizanne est responsable d'études et de recherches en géomécanique à l'Ineris. Il est diplômé d'un doctorat en mécanique des roches de l'Ecole polytechnique à Palaiseau, où il a travaillé sous la direction du professeur Pierre Bérest. Il détient également un master en sciences appliquées, spécialisé en génie civil et environnement, parcours mécanique des sols, des roches et des ouvrages dans leur environnement, obtenu à l'Ecole centrale Paris. Avant de rejoindre l'Ineris, il a exercé pendant cinq ans en tant qu'ingénieur géomécanicien sur le projet de stockage des déchets radioactifs au laboratoire souterrain de recherche de Meuse/Haute-Marne à Bure. Actif au sein du SMRI (*Solution Mining Research Institute*) depuis 2011, Hippolyte a été élu récemment membre de la commission scientifique de cet institut américain, un mandat qui débutera en janvier 2024 pour une durée de quatre ans.



Murielle Grange est directrice de projet chez Storengy, filiale d'Engie et spécialiste européen du stockage de gaz naturel. Storengy intervient dans 21 sites de stockage de gaz naturel répartis dans 3 pays européens et maintient près de 600 puits. Elle est titulaire d'un diplôme d'ingénieur hydrogéologue de l'université de Grenoble et d'ingénieur chimiste avec une spécialité en chimie analytique de l'Ecole de chimie physique et d'électronique de Lyon. Elle a travaillé pendant plus de 25 ans dans la réalisation de forages d'eau potable, minérale, thermique ou géothermique à des profondeurs allant jusqu'à 4 000 m. Depuis 4 ans, elle occupe chez Storengy le poste de directrice de projet pour des programmes de stockage souterrain d'hydrogène. A la date de soumission de cet article, Murielle Grange venait de rejoindre Engie Green en tant que directrice des opérations.



Plateforme de production de l'hydrogène.

principalement supporté par Storengy, HyPSTER implique la participation de huit autres partenaires européens : Ineris (France), Armines - École polytechnique (France), Inovyn (Royaume-Uni), ESK (Allemagne), ERM (Royaume-Uni), Axelera (France), Brouard Consulting (France) et Equinor (Norvège). Plusieurs sous-traitants contribuent également au projet, tels que Schneider Electric, TechnipFMC, Schlumberger, Elogen ou encore Howden.

Cet article présente une synthèse des travaux réalisés depuis janvier 2021 par les partenaires du projet HyPSTER, en mettant l'accent sur la maîtrise des risques et la réduction de l'impact environnemental du démonstrateur.

Méthodologie et concepts

Le projet HyPSTER se compose de deux volets principaux : une plateforme de production d'hydrogène vert et une plateforme vouée au stockage de l'hydrogène. Le projet rencontre plusieurs défis techniques et problématiques complexes. Le premier est la mise en place d'équipements (tuyauterie, vannes, réservoirs sous pression, etc.) compatibles avec l'hydrogène. Le second concerne la cavité saline et sa compatibilité avec le stockage d'hydrogène produit par des énergies renouvelables. Dans cette partie, plusieurs phases seront menées : la réalisation d'essais d'étanchéité à l'azote puis à l'hydrogène. Si ces essais sont concluants, les essais mécaniques de la cavité saline et des équipements du puits s'ensuivront, avec la réalisation de près de 100 cycles d'injection et de soutirage d'hydrogène. Les principaux éléments qui seront étudiés lors de ces cycles seront :

- le comportement thermodynamique de l'hydrogène ;
- les différentes interactions de l'hydrogène avec la cavité, la saumure et les équipements. Les paramètres qui seront particulièrement suivis sont la dissolution de l'hydrogène dans la saumure et l'impact des bactéries sur l'hydrogène.

Lancé en 2021, le projet a débuté avec des études d'ingénierie tant sur la partie surface (production d'hydrogène) que sur la partie sous-sol.

La construction a débuté en 2022 et, à ce jour, les essais ont commencé sur la cavité : les essais d'étanchéité à l'azote sont terminés, les tests d'étanchéité à l'hydrogène sont en cours.

Plateforme de production d'hydrogène

La plateforme de production d'hydrogène est composée de trois éléments principaux (photos) :

- Un électrolyseur de type PEM (*Proton Exchange Membrane*) de 1 MW comprenant quatre stacks, l'ensemble est containérisé. La capacité de production de ces équipements est de 209 Nm³/h, soit l'équivalent de 400 kg d'H₂ par jour à une température de 15 °C. La pression est de 30 bar ;
- Un compresseur permettant de monter la pression de l'hydrogène de 30 à 350 bar (entre les deux, un ballon qui œuvre comme un contrôleur manométrique pour temporiser les démarrages du compresseur) ;
- Deux platines de remplissage de tube trailers.

Plateforme de stockage souterrain de l'hydrogène

Le puits et la cavité EZ53 de la plateforme de stockage d'HyPSTER sont soumis à des essais d'étanchéité utilisant l'azote et l'hydrogène, ainsi qu'à des essais mécaniques comportant plusieurs cycles d'injection et de soutirage d'hydrogène (Grange et al., 2023).

Creusée dans les années 1980, la cavité EZ53 est située dans la couche de sel la moins profonde de Bresse Vallons, à environ 800 mètres de profondeur (par opposition aux autres cavités salines de Bresse Vallons qui sont à environ 1 400 mètres). Avec un volume de près de 8 000 m³, la cavité EZ53 n'a jamais été utilisée pour le stockage de gaz naturel. Toujours remplie de saumure, elle a été l'objet d'études scientifiques, notamment sous la direction du professeur Pierre Bérest pendant près de quatre décennies, ce qui en fait l'une des cavités salines les plus étudiées au monde.

Le puits de stockage souterrain EZ53 est sécurisé par deux niveaux de protection : une barrière primaire comprenant le sabot de cimentation, le packer de pro-



Plateforme de **stockage souterrain de l'hydrogène**, au centre la tête de puits EZ53.

duction, la colonne de production et la valve de sécurité souterraine, et une barrière secondaire formée par le tubage cimenté et la tête de puits.

Opérations en cours

Essais d'étanchéité

Dans le cadre de la sécurité du processus, la réalisation d'essais d'étanchéité est essentielle pour le projet HyPSTER. Ces tests sont réalisés dans un premier temps à l'azote et ensuite à l'hydrogène pour garantir que la cavité saline EZ53 et le puits, dont les équipements de complétion ont été changés, sont aptes à stocker de manière sécurisée l'hydrogène gazeux. Ces tests sont en cours. Ils consistent à tester l'ensemble par tronçons avec trois niveaux de positionnement de l'interface gaz-saumure. Comme le montre la figure 1, cet essai implique de remplir l'espace annulaire avec de l'azote puis de l'hydrogène sous pression, de stabiliser l'interface gaz-saumure, et de surveiller les variations de cette interface à l'aide d'un outil de diagraphie. La quantité de gaz étant minime par rapport à la masse de saumure, il est possible de quantifier avec précision les variations de la masse de gaz durant le test.

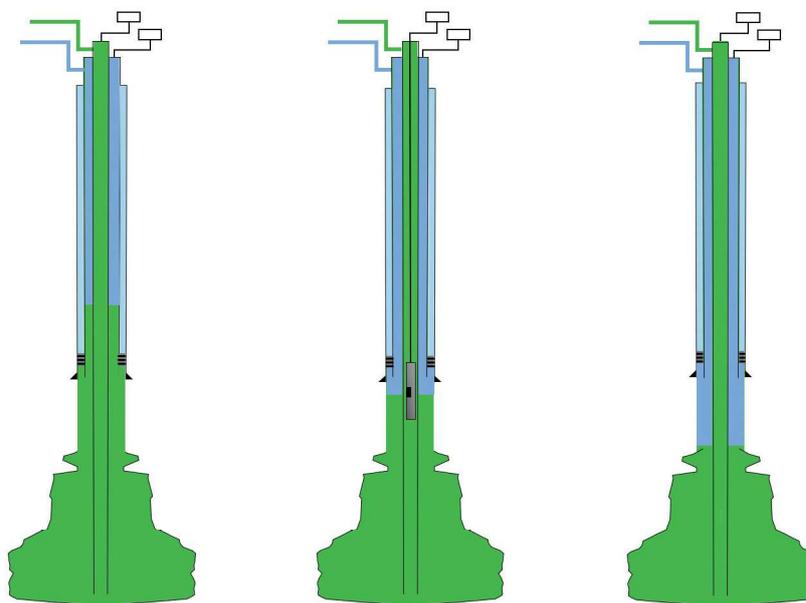
Essais de cyclage

En 2024, le projet envisage des essais mécaniques de cyclage de l'ordre de 100 cycles d'injection et de soutirage d'hydrogène. Chaque cycle a été conçu en tenant compte des besoins potentiels du marché en termes de production et donc de stockage ou en termes de consommation et ainsi de soutirage. Ces différents besoins impliquent des amplitudes distinctes, voire des périodes de stabilité si la consommation s'équilibre avec les demandes. L'objectif de ces essais est de confirmer ce qui a été simulé par des modèles mathématiques. Ils permettront notamment d'évaluer le comportement thermodynamique de l'hydrogène dans la cavité saline et d'apporter des éclairages supplémentaires sur les aspects géomécaniques de la cavité saline. La figure 2 illustre les différentes phases des tests de cyclage pour le puits et la cavité EZ53.

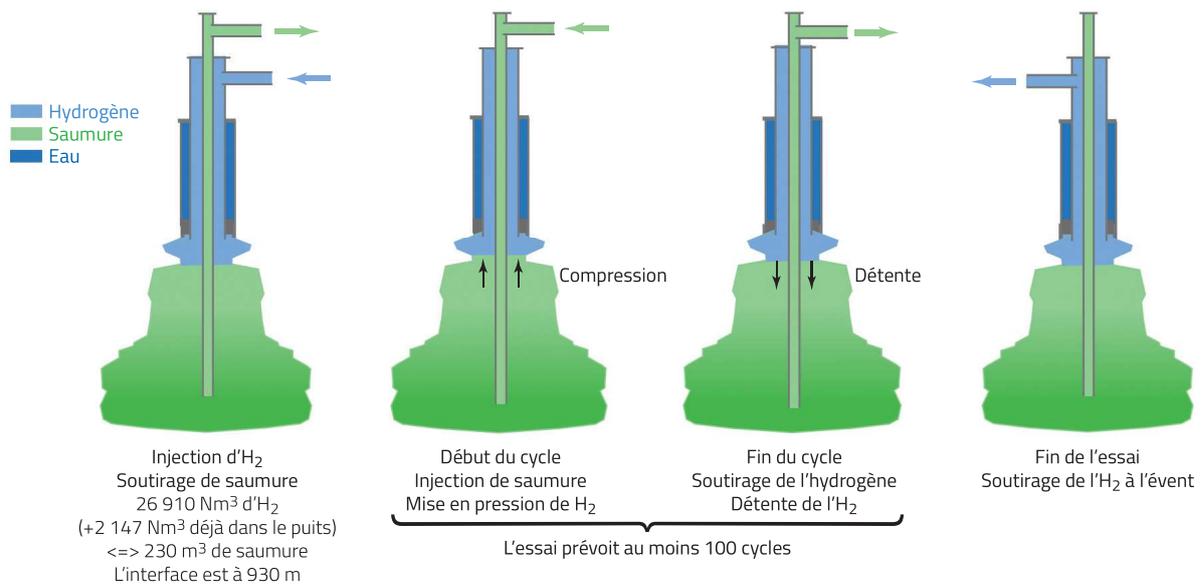
Évaluation de la sécurité du démonstrateur, de son impact sur l'environnement et de la réglementation en vigueur

Les défis majeurs liés à la gestion des risques pour le démonstrateur HyPSTER comprennent l'identification et l'évaluation approfondies des risques, l'analyse de l'impact environnemental, l'application de modèles numériques avancés pour affiner l'analyse des risques, le maintien d'une communication constante avec les autorités administratives compétentes (Dreal, ingénieur de l'environnement, préfecture et autres), la collecte exhaustive de données pendant les essais pour optimiser le retour d'expérience, et enfin la conduite d'une veille réglementaire et normative active en vue de formuler des recommandations pour la réplification du stockage d'hydrogène souterrain à l'échelle européenne.

1. Schéma de principe des trois étapes d'un **essai d'étanchéité** à l'azote ou à l'hydrogène du projet HyPSTER.



2. Schéma de principe des différentes étapes de l'essai mécanique cyclique.



Sécurité du démonstrateur

L'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) dirige le groupe de travail chargé d'évaluer les risques environnementaux et de sécurité liés à la démonstration industrielle, ainsi que les réglementations applicables. Ces aspects sont cruciaux pour obtenir les autorisations administratives et pour l'acceptation publique de cette nouvelle technologie. Les participants à ce groupe de travail sont tenus de prouver la sûreté et l'impact environnemental minimal du démonstrateur. Une analyse approfondie de la sécurité est donc nécessaire pour identifier, évaluer et maîtriser les risques pour les personnes et l'environnement.

Dans ce cadre, une analyse préliminaire des risques (APR) a été réalisée en 2021 sur les plateformes de production et de stockage d'hydrogène (Pique et al., 2021). Cette étude a souligné les risques liés à des pertes de confinement et à des surpressions potentielles, pouvant entraîner des phénomènes dangereux, tels que les feux de torche, de nuages inflammables, les explosions de nuages ou de vapeurs (UVCE) et les ruptures d'équipements. Des stratégies de prévention et de protection ont été proposées pour minimiser ces risques, incluant :

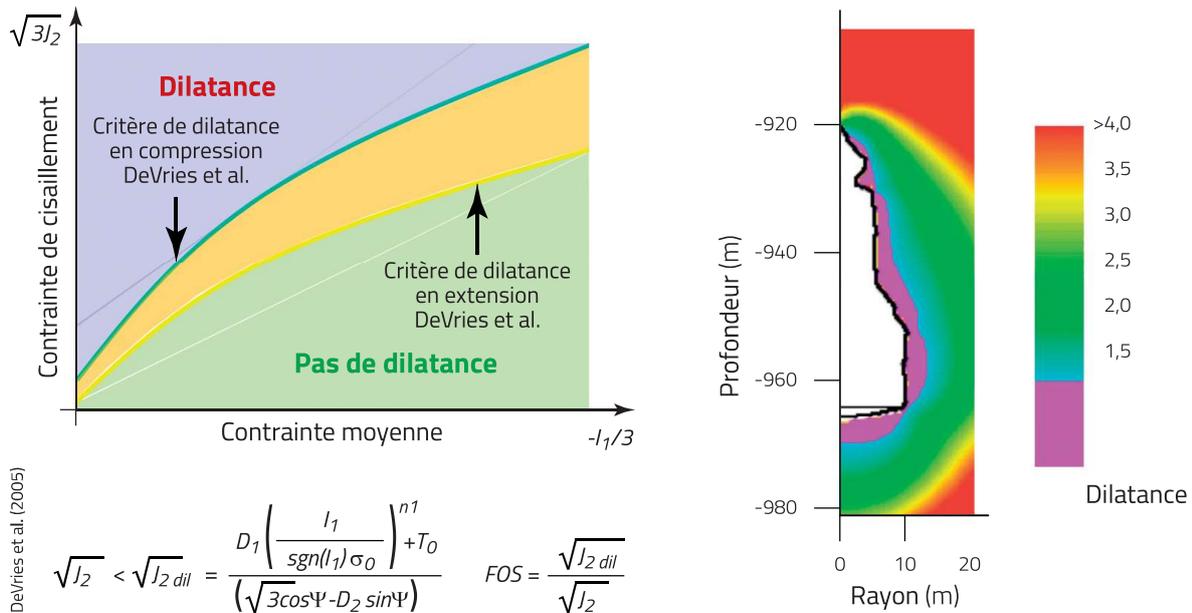
- la vérification de l'étanchéité de la cavité saline et du puits avant le premier remplissage ;
- l'isolement des installations de surface et des installations souterraines ;
- la gestion des surpressions avec des soupapes de sécurité, des événements et des systèmes de détection de pression ;
- la prévention du mélange d'hydrogène et d'oxygène lors de l'électrolyse et du contrôle du niveau d'oxygène avant la purification ;
- la détection anticipée de la formation d'ATEX [atmosphère explosive, ndlr] et la mise en place de systèmes de détection d'incendie par UV.

À la suite de l'APR, une revue Hazop (*Hazard and Operability Study*) et une étude du niveau d'intégrité de sécurité (SIL) ont été menées par DNV. Au total, 38 phénomènes dangereux ont été examinés et un rapport Hazop a été produit par Hazop Optima.

Apports de la modélisation numérique à l'analyse des risques

Les modèles mathématiques, physiques et la modélisation numérique sont des outils-clés pour l'analyse des risques dans le stockage souterrain de l'hydrogène. Dans le système composé du puits et de la cavité saline, des phénomènes tels que la thermodynamique, la mécanique des fluides et la mécanique des roches, notamment celle du sel gemme, jouent un rôle crucial. Ces phénomènes, étudiés dans le projet HyPSTER, comprennent la fermeture de la cavité saline par fluage du sel, la dissolution, la cristallisation, la condensation, la micro-perméation, les fuites, ainsi que les effets des variations de pression et de température. Comprendre ces interactions est essentiel pour développer des solutions de stockage souterrain d'hydrogène à la fois robustes et sûres.

En géomécanique, la modélisation prend en compte des paramètres essentiels pour établir des seuils de sécurité opérationnelle et détecter les signes avant-coureurs de possibles incidents. Parmi ces paramètres figurent les pressions opérationnelles minimales et maximales, les chargements cycliques lors de l'injection et du soutirage d'hydrogène et donc les variations répétées de température et de pression dans la cavité. Se préparer aux scénarios les plus extrêmes renforce la résilience et la fiabilité de notre infrastructure à hydrogène, assurant sa capacité à résister aux conditions les plus défavorables. Dans cette optique, les risques tels que la perte de volume rapide de la cavité, la subsidence sévère en surface, l'écaillage et les micro-



fissures, la perte d'étanchéité et, dans le pire des cas, l'effondrement généralisé, sont analysés.

Des logiciels développés par les partenaires du projet, tels que Locas (Brouard Consulting) et Kavpool (ESK), sont utilisés pour évaluer le comportement de l'hydrogène dans le puits et dans la cavité, ainsi que la stabilité mécanique de la cavité EZ53 sous diverses sollicitations d'exploitation, y compris des scénarios catastrophiques. Plus concrètement, la stabilité mécanique de la cavité saline a été testée face à des sollicitations extrêmes comme un soutirage rapide d'hydrogène engendrant un refroidissement intense ou une détente considérable de gaz dans la cavité, un chargement cyclique rapide d'injection et de soutirage d'hydrogène, et une éruption du puits.

L'éruption d'un puits de stockage d'hydrogène, scénario accidentel où la tête du puits cède sous la pression maximale, libérant de l'hydrogène dans l'atmosphère, a été étudiée (Djizanne et al., 2022). En plus de la modélisation géomécanique souterraine, des modèles de dispersion atmosphérique sont utilisés par l'Ineris pour simuler la dispersion d'un nuage d'hydrogène après une éruption. Les distances d'impact en surface à la suite d'une éruption ont été calculées avec des logiciels, tels que Phast (DNV) pour la modélisation 2D, et FDS (*Fire Dynamics Simulator*) pour la modélisation 3D. Ces recherches, coordonnées par le professeur Pierre Bérest, ont donné lieu à plusieurs publications scientifiques.

La sécurité peut aussi être vue comme un produit "sociotechnique" combinant des aspects techniques, humains et organisationnels. L'expérience de l'Ineris dans ces trois domaines est essentielle pour la préparation des essais en cours dans le cadre du projet HyPSTER. Du point de vue technique, l'Ineris a élaboré et validé avec Storengy, pour le projet, un fichier destiné à enregistrer les situations potentiellement dange-

reuses liées à la mise en œuvre de l'hydrogène. Ce formulaire intègre les particularités du système HiPo (*High Potential*) de qualification et d'analyse d'incidents de Storengy et s'appuie sur la base de données européenne Hiad-DB (*The Hydrogen Incident and Accident Database*). Concernant les aspects humains et organisationnels, des entretiens ont été menés avec les principaux acteurs du projet, aboutissant à un profil détaillé de la dimension humaine et organisationnelle de la sécurité du projet. La prise en compte de l'ensemble de ces aspects est cruciale pour faciliter l'adaptation et la réplique du démonstrateur à l'échelle nationale et européenne.

L'évaluation des risques est donc une démarche à la fois théorique et pratique, essentielle pour la conception du démonstrateur, pour l'analyse des scénarios d'exploitation les plus défavorables et la mise à jour des protocoles de sécurité et, à terme, de la réglementation en vigueur pour ce type d'installation.

Contexte réglementaire en France

La réglementation en vigueur en France comme en Europe a beaucoup évolué et continue de s'adapter aux enjeux et aux ambitions nationales et européennes autour du stockage souterrain de l'hydrogène. Par exemple, en France, l'ordonnance n° 2021-167 du 17 février 2021 relative à l'hydrogène, parue au JORF du 18 février 2021, c'est-à-dire après le démarrage du projet HyPSTER, a permis de modifier le Code minier pour y intégrer l'hydrogène.

Le processus d'autorisation pour le stockage souterrain de l'hydrogène en France implique plusieurs étapes et réglementations énoncées dans le Code minier et dans le Code de l'environnement. Dans un premier temps, il est crucial de déterminer si le démonstrateur se réalisera sur un nouveau site ou sur un site existant déjà autorisé. Pour un nouveau site, la

première étape consiste à solliciter un permis pour le stockage souterrain conformément au Code minier. À la suite de cela, un permis d'exploitation doit être obtenu, qu'il s'agisse d'un permis de recherche ou d'une concession. Le classement du projet en tant qu'ICPE dépend de la quantité d'hydrogène utilisée. Pour les projets classés Seveso ou impliquant de grandes quantités d'hydrogène, des études d'impact environnemental et des enquêtes publiques peuvent s'avérer nécessaires. Les installations manipulant moins de 100 kg d'hydrogène peuvent se contenter d'une simple déclaration, tandis qu'au-delà une autorisation est requise. Le dossier est examiné par les autorités compétentes (Dreal, préfecture et autres), et une instruction est donnée sur les besoins supplémentaires. Pour les sites existants, le processus comprend l'information du préfet sur les changements envisagés et la possibilité d'une étude d'impact environnemental selon la nature et l'ampleur des changements proposés. Le processus se termine par l'obtention des autorisations administratives nécessaires après l'examen des demandes et des études d'impact assurant ainsi la conformité du projet avec les réglementations environnementales en vigueur. Toutes les autorisations administratives du projet d'expérimentation HyPSTER ont été obtenues 18 mois après le début du projet.

Intégrer l'hydrogène vert dans nos systèmes énergétiques

L'hydrogène gazeux est stocké avec succès en cavité saline depuis bientôt 40 ans pour le site le plus ancien au Texas (Clemens Dome, Moss Bluff, Spindletop), et au Royaume-Uni (Teesside) pour des besoins de l'industrie chimique. Le projet HyPSTER vise à démontrer le fonctionnement à l'échelle industrielle du stockage souterrain de l'hydrogène vert en cavité saline pour des besoins énergétiques. Ce projet répond ainsi à la nécessité de stocker des énergies renouvelables intermittentes et de fournir de manière flexible de l'hydrogène vert pour la mobilité, l'industrie et les usages résidentiels et énergétiques.

Les phases initiales du projet se sont concentrées sur la conception des installations de production et de stockage, ainsi que sur la sélection d'équipements spécifiquement adaptés à l'hydrogène, dans le but d'assurer la réussite des essais, la sécurité du démonstrateur, son efficacité opérationnelle et la minimisation de son impact sur l'environnement.

Deux catégories d'essais sont en cours : des essais d'étanchéité du puits et de la cavité utilisant l'azote et l'hydrogène, ainsi que les essais de cyclage. L'objectif principal de ces essais est de garantir que le stockage de l'hydrogène se déroule en toute sécurité. Les données recueillies lors de ces essais contribuent à la validation de la conception du démonstrateur, à l'évaluation de la capacité de la cavité EZ53 à stocker de l'hydrogène gazeux, à la vérification de l'adéquation des matériaux utilisés pour l'équipement du puits et à la confirmation de la sûreté et de la fiabilité des procédures opérationnelles.

Le respect du processus réglementaire assure la conformité légale et opérationnelle du projet de stockage d'hydrogène, tout en favorisant l'acceptation par le public et la protection de l'environnement. HyPSTER va bien au-delà de la simple question du stockage : il vise à intégrer l'hydrogène vert dans nos systèmes énergétiques, à sécuriser l'approvisionnement et à favoriser la décarbonisation de multiples secteurs. ■

*Hippolyte Djizanne, Ineris,
et Murielle Grange, Storengy*

Remerciements

Le projet HyPSTER a bénéficié d'un financement partiel de la part du *Clean Hydrogen Partnership* de l'Union européenne, sous le numéro de convention de subvention 101006751. Ce projet inclut les contributions de recherche de plusieurs entités notables, telles que Storengy (France), Ineris (France), Armines - Ecole polytechnique (France), Inovyn (Royaume-Uni), ESK (Allemagne), ERM (Royaume-Uni), Axelera (France), Brouard Consulting (France) et Equinor (Norvège). Nos sincères remerciements sont adressés à la mémoire du professeur Pierre Bérest.



Bibliographie

1. Bérest P. (2021). Cavernes de sel : la clé pour stocker l'hydrogène ? Polytechnique Insights, 13 octobre.
2. Djizanne, H., Murillo Rueda, C., Brouard, B., Bérest, P. & Hévin, G. (2022). Blowout Prediction on a Salt Cavern Selected for a Hydrogen Storage Pilot. *Energies Journal*. *Energies* 2022, 15(20), 7755; <https://doi.org/10.3390/en15207755>.
3. Grange, M., Hévin, G. & Djizanne, H. (2023). HyPSTER: 1st Demonstrator for Green Hydrogen Storage in France. SMRI Fall Technical Conference, 1-4 October, San Antonio, USA, 22p.
4. Pique S., Djizanne H., Thoraval A., and Hévin G (2022). Risk identification for a hydrogen underground storage and production platforms. *Gastech Hydrogen*, 5-8 September, Fiera Milano, Italy.