

12 juin 2024

ACCÉLÉRER LA CARACTÉRISATION DE LA RESSOURCE ET L'EXPLORATION DE L'HYDROGÈNE NATUREL EN FRANCE

1. Contexte et objet de l'avis	2
2. Rappel	2
2.1. Origine de l'hydrogène naturel	2
2.2. Positionnement de l'hydrogène naturel vis-à-vis des autres sources d'hydrogène	3
3. Écosystème actuel	3
3.1. Deux permis attribués, à date	3
3.2. Demandes de permis en cours	3
3.3. Projets de recherche	4
4. Analyse du contexte international	4
5. Évaluation du sous-sol français	5
6. Développer le savoir-faire français	6
6.1. Outils de modélisation (bassins et réservoirs)	6
6.2. Outils de caractérisation de roches génératrices d'hydrogène	6
6.3. Outils de géophysique, de mesure de gaz, de <i>remote sensing</i>	6
6.4. Mise en valeur de la technologie et du leadership français	7
7. Comment accélérer l'arrivée du <i>first-gas</i> en France	7
7.1. Permis	7
7.2. Financement	7
7.3. Image et promotion du « sous-sol bien commun »	8
8. Conclusions et recommandations	8



1. Contexte et objet de l'avis

La France a été pionnière dans la promotion de l'hydrogène naturel comme source d'énergie et/ou matière première. L'IFPEN¹ a travaillé sur le sujet dès 2011, et depuis cinq ans la recherche française, en particulier l'UPPA², l'Université de Grenoble et l'IPGP³ sont les leaders du domaine. Début 2022 la France a reconnu dans le code minier⁴ l'hydrogène natif comme une ressource et les premiers permis d'exploration ont été déposés. En parallèle, les pays historiquement plus à l'aise avec l'exploitation des richesses du sous-sol, comme les États-Unis et l'Australie, ont pris conscience du potentiel des ressources en hydrogène sur leur territoire et accélèrent le développement de cette nouvelle filière. La géologie de certaines régions de France est propice à la présence de cette ressource. Cette note vise à relever les points qui pourraient permettre de développer plus rapidement ce potentiel pressenti et de positionner notre industrie dans ce nouvel écosystème.

2. Rappel

2.1. Origine de l'hydrogène naturel

L'hydrogène naturel se forme continûment dans le sous-sol du fait de différentes réactions, la plus connue est la réduction de l'eau en présence de roches riches en fer (celui-ci s'oxyde). L'hydrogène libéré remonte vers la surface et peut s'accumuler dans le sous-sol s'il y a une barrière, roche de faible perméabilité, comme, par exemple, une couche salifère. Si la température est élevée, ces réactions peuvent être très rapides. Comme la vapeur d'eau en géothermie, le flux d'hydrogène peut être continu à l'échelle humaine. Une autre réaction est la radiolyse par la radioactivité naturelle des roches qui casse la molécule d'eau : là encore l'hydrogène s'échappe et peut s'accumuler. Les roches radioactives peuvent produire aussi de l'hélium, un autre gaz à forte valeur et en tension sur le marché mondial. La radioactivité est un phénomène lent, mais qui existe depuis le début de la formation de la Terre et continuera jusqu'à la fin du Système solaire. Enfin, la maturation tardive de la matière organique, en particulier des charbons, libère aussi, au-dessus de 200 °C, de l'hydrogène en profondeur, tout comme les processus industriels de gazéification du charbon. Ces trois réactions ont été observées en France, mais, à l'heure actuelle, les quantités potentiellement exploitables de ces différentes modalités de génération de l'hydrogène en France restent méconnues.

Il existe d'autres réactions, telles que la libération d'inclusions fluides ou une activité biogénique, mais aucun industriel n'a déposé de demande de permis à ce jour fondée sur des prospects liés à ces hypothèses.

Enfin, il faut noter que l'hydrogène, l'élément le plus abondant de l'univers (75 % en masse), n'est présent dans l'atmosphère qu'à l'état de trace (0,5 ppm); certains se posent la question d'un piégeage de l'hydrogène primordial existant dans le manteau, voire le noyau terrestre, et qui dégagerait progressivement et de manière permanente. Cette hypothèse qui impliquerait une présence généralisée d'hydrogène reste à valider, car, aujourd'hui, les puits et émanations d'hydrogène connus sont généralement associés à des roches peu profondes.

1. IFP Énergies nouvelles

2. Université de Pau et des Pays de l'Adour

3. Institut de physique du Globe de Paris

4. https://www.legifrance.gouv.fr/codes/texte_lc/LEGITEXT000023501962/

2.2. Positionnement de l'hydrogène naturel vis-à-vis des autres sources d'hydrogène

L'hydrogène est actuellement produit industriellement par des procédés plus ou moins consommateurs d'énergie et d'eau (comme l'électrolyse) plus ou moins émetteurs de dioxyde de carbone (comme le vapocraquage du méthane ou la gazéification du charbon). L'hydrogène est une matière première mais il peut aussi être un vecteur énergétique. Par souci de clarification, il est courant d'attribuer une couleur symbolique à l'hydrogène en fonction de son mode de production. Ainsi, l'hydrogène naturel, sujet de cet avis, est souvent qualifié d'hydrogène blanc quand celui produit par vapocraquage du méthane sans captage de dioxyde de carbone (CO₂) est qualifié d'hydrogène gris. Mais ces qualifications peuvent conduire à des ambiguïtés : par exemple l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau avec les caractéristiques du mix électrique mondial actuel émet plus de CO₂ que celui produit par vapocraquage. Les textes officiels, aux USA comme en Europe, se réfèrent aux émissions de CO₂, des hydrogènes produits.

Actuellement plus de 95 % de l'hydrogène utilisé est produit avec des hydrocarbures et du charbon. L'hydrogène produit par l'électrolyse de l'eau à partir d'énergies renouvelables ne représente que moins de 0.5 % des volumes utilisés. Il est donc urgent de développer toutes les alternatives à faible impact : les consommations d'énergie et d'eau sont à prendre en compte ainsi que le prix de l'hydrogène, qui exercera aussi une forte influence sur son adoption par les marchés.

L'utilisation de l'hydrogène et son potentiel pour décarboner une partie de l'industrie a déjà fait l'objet d'un rapport de l'académie auquel le lecteur pourra se référer.⁵

3. Écosystème actuel

L'exploration de l'hydrogène naturel n'a démarré en France que depuis 2022 mais des projets de recherche sont actifs depuis plus d'une dizaine d'années.

3.1. Deux permis attribués, à date

- TBH2⁶ a un permis hydrogène au sud d'Orthez.
- 45-8 Energy⁷ bénéficie de deux permis hélium dans la Nièvre et dans le Doubs.

3.2. Demandes de permis en cours

- 45-8 Energy et Storengy : deux demandes en Nouvelle-Aquitaine ; les premières étapes ont été passées (en particulier la mise en concurrence) ; l'octroi est attendu dans l'année.
- La Française de l'énergie⁸ (FDE) a demandé un permis dans l'Est (en cours de mise en concurrence).
- SudMine⁹ : deux demandes en cours (lithium et hydrogène) dans le Massif central et dans le Bugey.

5. <https://www.academie-technologies.fr/publications/role-de-lhydrogene-dans-une-economie-decarbonee/>

6. Nom complet TBH2 Aquitaine société créée en 2022.

7. Start-up en pointe sur la recherche et l'exploitation de l'hydrogène et de l'hélium natifs. Créée en 2017 elle a actuellement 33 collaborateurs.

8. Société minière créée en 2008 positionnée au départ sur l'extraction minière du gaz de charbon.

9. Société minière créée en 2013, avec une vocation « verte ».

3.3. Projets de recherche

- H2NA : la Nouvelle-Aquitaine a fait évaluer par ce groupement le potentiel de la région, sur la base d'une synthèse des données existantes.
- Quelques thèses ont été financées par des industriels (actuellement, ce sont les premiers financeurs) ainsi que sur fonds publics.
- Quelques postdocs ont été financés dans le cadre du plan de relance (dont deux entre 45-8 Energy et UPPA).
- Un groupement de recherche HydroGemm, a été mis en place et permet des rencontres biennuelles des acteurs publics français, mais aussi de quelques industriels. Il couvre tous les aspects de l'hydrogène dans le sous-sol et on y trouve donc aussi des acteurs du stockage souterrain de gaz.
- Le programme et équipement prioritaire de recherche (PEPR) Sous-sol, bien commun qui démarre n'a pas de ligne spécifique à l'hydrogène ou l'hélium, mais dans le cadre des chantiers régionaux, un ou deux étudiants sont financés sur des travaux liés à la ressource en hydrogène.

4. Analyse du contexte international

Depuis deux ans, l'Australie a intensifié ses efforts, et, depuis un an, les États-Unis suivent le même chemin. Le CSIRO¹⁰ et *Geoscience Australia* multiplient les acquisitions de données et les publications. Des laboratoires français, l'UPPA, et l'IFPEN collaborent avec ces organismes australiens et une double réunion (business/recherche) a été organisée à Perth en novembre 2023 par des acteurs français.

En octobre et novembre 2023, deux premiers puits forés sur la péninsule de Yorke, en face d'Adélaïde ont permis de découvrir de fortes teneurs d'hydrogène et d'hélium.

Les investissements de fonds privés comme *Breakthrough Energies Ventures* sont également très significatifs. L'Australie et les États-Unis commencent à attirer les meilleurs docteurs français.



Cartographie des acteurs mondiaux, image mise à jour par Earth2, 45-8 et Storengy. Le paysage évolue très rapidement

10. Le Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation est une agence gouvernementale australienne.



L'*Advanced Research Project Agency-Energy* (ARPA-E) aux États-Unis a dédié un budget de 20 millions de dollars qu'il a essentiellement affecté à des projets de recherche sur la génération d'hydrogène par injection d'eau dans des roches riches en fer. Cet hydrogène non naturel est dit orange. Une partie de ces recherches porte sur la vitesse des réactions de réduction de l'eau en contact avec les roches ultramafiques¹¹ et elles seront donc aussi intéressantes pour l'hydrogène naturel.

Les permis obtenus par Koloma et les travaux de l'USGS¹² sont eux bien centrés sur l'hydrogène naturel. L'*Inflation Reduction Act* promulgué par l'administration Biden en 2022 offre un bonus fiscal de 3 \$/kg d'hydrogène décarboné produit aux États-Unis ce qui diminue très fortement le risque financier sur les projets d'exploration américains.

Sur le plan international si les majors (*grandes compagnies internationales Oil&Gas*) ont une veille active, aucune des IOC (International Oil Company) n'a pris pour l'instant officiellement de permis d'exploration. Le paysage est très différent pour les NOC (National Oil company) qui, après une phase initiale de veille, sont passées mi-2023 à l'acquisition de données et à l'évaluation du sous-sol de leur pays (PETROBRAS, ECOPETROL, SAUDI ARAMCO, ADNOC). On peut penser que dès qu'une découverte importante aura été prouvée, les IOC prendront à leur tour des permis. Elles aiment se définir comme des « *fast followers* »...

5. Évaluation du sous-sol français

Une évaluation de l'ensemble du territoire avec une approche similaire à celle qui a été menée par la région Nouvelle-Aquitaine peut être faite. Le projet H2NA réunit l'UPPA, le BRGM, le groupe CVA, qui assure la maîtrise d'œuvre, et des industriels (Engie et 45-8 Energy) qui ne sont pas subventionnés, mais mettent à disposition leur matériel et leur personnel. Cette étude pionnière a conduit aux nombreuses demandes de permis dans la région.

De tels projets relèvent plus d'une compilation de données et de l'acquisition de mesures complémentaires que de recherche fondamentale, ce qui constitue un écueil à leur financement. Ces mesures sont faciles, mais chronophages. Il est aussi à noter que, parmi les établissements publics à caractère industriel et commercial ayant une compétence en matière de sous-sol, seul l'IFPEN a repris depuis trois ans le sujet hydrogène naturel. Le BRGM est globalement plus éloigné de cette thématique, même si quelques experts en géosciences s'y consacrent.

La Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) a formulé une première demande d'état des lieux auprès de l'IFPEN pour une durée d'un an. Actuellement, un budget de 300 000 € est alloué à cette activité, sans acquisition de nouvelles données. Cela constitue un début, la somme est limitée et le temps bref mais il est prévu que ce livrable prenne la forme d'une feuille de route. Lors de la réunion de lancement, la plupart des chercheurs ont exprimé leur satisfaction face à cette initiative, ainsi que leur frustration face à l'absence d'actions immédiates de l'État, alors que les projets sont déjà bien avancés. Ils ont également noté que les États-Unis, qui étaient en retard il y a un an, disposent désormais d'une capacité d'action significative.

Un plan d'acquisition de nouvelles données, incluant la mesure des gaz dans les sols, la cartographie des roches génératrices et l'évaluation de leur potentiel, pourrait être rapidement mis en œuvre. Parallèlement, des recherches plus fondamentales pourraient être conduites, telles que l'étude de la cinétique des réactions, le mode de transport de l'hydrogène dans le sol, ainsi que le rôle de l'eau dans les systèmes hydrogène.

11. Roches riches en fer et en magnésium d'origine océanique ou mantellique

12. *United States Geological Survey* (USGS) aux États-Unis correspond au BRGM français

6. Développer le savoir-faire français

6.1. Outils de modélisation (bassins et réservoirs)

La prise de décision dans le monde des ressources du sous-sol se fonde sur la modélisation afin d'extrapoler intelligemment les données partielles dont on dispose. Actuellement ces outils manquent pour l'exploration de l'hydrogène. Les deux leaders mondiaux de la modélisation de bassins et de réservoirs d'hydrocarbures sont l'IFPEN (et sa filiale le BEICIP) et Slb (Schlumberger). Aider l'IFPEN à développer un module Hydrogène complétant ses progiciels et prenant en compte, entre autres, les transports réactifs et la cinétique de génération constitue un enjeu majeur.

Ces outils seront également utiles pour développer le stockage du CO₂ et le management des stockages d'hydrogène en aquifère si les volumes le nécessitent ; en effet, les stockages en cavité saline sont plus petits et ne sont pas disponibles partout.

La génération de l'hydrogène par les différentes réactions mentionnées commence à être comprise, mais le comportement des réservoirs en cours de production et leur gestion dans la durée restent inconnues, or elles conditionneront l'industrialisation de ces productions. En effet il n'existe, à ce jour, que les puits en production forés au Mali.

Le comportement de l'eau dans les aquifères sous-jacent doit aussi être étudié : l'hydrogène est peu soluble dans l'eau à faible pression, mais cette solubilité augmente avec la pression. C'est en particulier ce qu'ont observé les chercheurs de l'université de Lorraine qui ont testé un appareil de mesure de gaz dissous à différentes pressions : ils ont constaté que les indices d'hydrogène augmentaient avec la profondeur. Cette découverte a été largement relayée dans la presse. L'hypothèse d'un dégazage de l'hydrogène dissous dans l'aquifère sous-jacent lors d'une mise en production, est donc probable mais des évaluations quantitatives restent à développer.

6.2. Outils de caractérisation de roches génératrices d'hydrogène

Actuellement la caractérisation du potentiel des roches génératrices est lente et nécessite plusieurs mois de travail. Des idées pour accélérer le processus sont à l'étude, notamment par l'adaptation des outils de pyrolyse tels que le *Rock Eval*. Le développement de mesures de paramètres corrélés (proxies) de type signal magnétique ou concentration en thorium est également en cours. Il faudrait introduire ces technologies sur le marché.

6.3. Outils de géophysique, de mesure de gaz, de *remote sensing*

Le secteur des hydrocarbures est habitué à utiliser des méthodes performantes, mais onéreuses. Actuellement les compagnies qui débutent l'exploration de l'hydrogène sont de petite taille et doivent emprunter des fonds pour lancer leurs activités avant le *first gas*, la première production de gaz. Elles ne peuvent donc pas se permettre de réaliser, par exemple, une acquisition sismique 3D. Les compagnies de géophysique tentent de s'adapter en proposant des outils à faible coût permettant de mettre en œuvre des techniques de sismique passive et de petites acquisitions. La géothermie rencontre des difficultés similaires. Là aussi, une aide étatique pour développer ces outils serait la bienvenue et *Evolen* pourrait être un acteur clé pour encourager les propositions et subventionner les meilleures initiatives. Il est à noter que beaucoup de compagnies de géophysique concernées ont été créées par d'anciens ingénieurs de CGG-Viridien et sont de petites structures sans réelle capacité de recherche.

6.4. Mise en valeur de la technologie et du leadership français

En Europe, la filière se structure actuellement autour de Earth 2¹³ porté par le Pôle AVENIA¹⁴. L'Agence internationale de l'énergie (AIE) vient aussi de créer une *task force* hydrogène naturel. Earth 2 qui comprend déjà une quarantaine de membres, commence à bien fonctionner et il serait bénéfique de l'aider à se développer. De même, il serait avantageux pour les Français d'être bien positionnés au sein de l'AIE. Il est à noter que l'AIE ne rémunère pas ses experts, ce sont en général les États ou les compagnies qui s'en chargent. Le CEA¹⁵ a mis à disposition de l'AIE son responsable de l'hydrogène et actuellement l'IFPEN se positionne auprès de l'AIE sur l'hydrogène naturel.

Concernant les congrès, le seul événement dédié à ce jour à 100 % à l'hydrogène naturel est H-NAT¹⁶. Lancé par la compagnie événementielle française Valuexchange (anciennement Corp) en 2021, ce congrès s'est tenu en Australie en 2023, et le prochain aura lieu à Paris en novembre 2024. Compte tenu de l'activité en France, il serait souhaitable que les institutions gouvernementales soient présentes et visibles pour promouvoir le secteur minier national ainsi que notre écosystème industriel et de recherche.

7. Comment accélérer l'arrivée du *first-gas* en France

7.1. Permis

Les candidats aux permis d'exploration souhaitent un raccourcissement des délais d'obtention des permis exclusifs de recherche (PER) et une simplification des procédures actuelles qui imposent des demandes distinctes pour l'hydrogène et pour l'hélium, ces dernières étant traitées par deux guichets différents. Le délai de dix-huit mois est jugé trop long d'autant plus qu'il semble être dû à un manque de personnel. Les demandes de concession de production sont réputées encore plus lentes, pouvant aller jusqu'à trois ans. En comparaison, en Allemagne, les réponses pour l'hélium sont fournies en moins de trois mois.

Il faut cependant noter que les compagnies qui prennent actuellement des permis sont pour la plupart de petites compagnies et qu'elles n'ont pas une force de frappe suffisante, ni en personnel ni en fonds propres, pour commencer massivement les acquisitions une fois les permis octroyés.

7.2. Financement

Le soutien financier des banques telles la BPI est crucial pour les petites compagnies. La labélisation au niveau de la Commission européenne de l'hydrogène naturel comme hydrogène décarboné est évidemment essentielle pour accéder à des subventions potentielles et pour faciliter la commercialisation en cas de découverte. La plupart des investisseurs ne sont pas habitués à gérer le risque « sous-sol », qui consiste en fait en une gestion de l'incertitude, dans les projets. Il serait donc bénéfique que l'État accompagne les premiers développeurs. Un appel à manifestation d'intérêt de la part de France 2030 serait aussi important.

13. Initiative européenne pour l'hydrogène natif. <https://www.earth2-hydrogen.com/en/home/>

14. Le pôle AVENIA est un pôle de compétitivité dédié aux industries du sous-sol. Il est implanté à Pau.

15. Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies alternatives

16. H-NAT par Valuexchange : <https://www.hnatworldsummit.com/>

7.3. Image et promotion du « sous-sol bien commun »

Jusqu'à présent l'exploration de l'hydrogène naturel a bénéficié d'un écho plutôt favorable dans la presse et auprès du public. Les citoyens des zones concernées par les premiers permis se montrent curieux et positifs et les compagnies opératrices travaillent en toute transparence. Cependant, il est probable que des oppositions émergent, bien que leur origine et leur virulence soient encore inconnues. Il serait judicieux d'anticiper ces réactions en impliquant des chercheurs des sciences humaines et sociales (SHS) des zones concernées pour connaître et comprendre les réactions régionales et locales le plus tôt possible, au-delà des positions étatiques. Dans le cadre du PEPR, ce volet est mentionné et pour l'instant, les opérateurs, en particulier 45-8 font un excellent travail d'information et de transparence auprès de la population.

8. Conclusions et recommandations

- La filière de l'hydrogène naturel s'est organisée de manière autonome au cours des trois dernières années. Il n'est pas nécessaire de « réinventer la roue », ni de créer de grands organismes, des agences ou des plans. Ce qu'il faut, c'est aider cette filière à croître plus rapidement en utilisant les acteurs et les guichets déjà en place, tout en leur octroyant des fonds spécifiquement dédiés à cette nouvelle ressource. Pour la recherche par exemple le PEPR sous-sol bien commun pourrait être le bon outil s'il oriente une partie de son budget vers ce sujet.
- La labélisation de l'hydrogène naturel, également appelé hydrogène blanc, en tant qu'hydrogène décarboné au niveau de l'Union européenne et, plus généralement, à l'échelle internationale, est cruciale.
- L'*Inflation Reduction Act* aux États-Unis constitue un très puissant levier pour attirer les compagnies d'exploration. Les fonds consacrés aux États-Unis à la recherche publique (les 20 millions déjà cités) vont accélérer rapidement le savoir-faire outre-Atlantique et attirer nos cerveaux. La France doit réagir ; les sommes à mettre en jeu ne sont pas énormes. Quelques millions suffiraient pour faire une évaluation à grande échelle des zones prospectives. Par exemple, une somme équivalente aux 500 000 € investis en Nouvelle-Aquitaine pour chaque région permettrait de compléter les cartes et d'avancer significativement dans cette exploration.
- Pour les petites compagnies qui ont commencé l'exploration, le coût des puits à forer est relativement bas (en comparaison de puits profonds en mer). Quelques dizaines de millions d'euros suffiraient à les aider à évaluer les zones prospectives. Il est important de noter que nous ne recommandons pas de réaliser des puits de recherche scientifique, mais plutôt d'aider les compagnies opératrices. En contrepartie, l'obligation de rendre publiques les données acquises serait logique.
- Par ailleurs, on observe une certaine opposition croissante des promoteurs de l'hydrogène issu des électrolyseurs, dit hydrogène vert, qui le présentent comme la seule alternative pour un hydrogène décarboné. Cette critique, bien que réelle semble un peu dérisoire au vu de l'enjeu et des chiffres : 99 % de l'hydrogène actuel vient de l'industrie chimique (méthane, charbon, pétrole, hydrogène sulfuré) il est donc gris ou noir. Nous recommandons donc de soutenir tous les hydrogènes décarbonés avec la même vigueur.
- L'industrie du « parahydrogène » doit être développée, comme l'a été celle du parapétrolier en son temps via le FSH (Fonds de Soutien aux Hydrocarbures), pour que les compagnies de service puissent aussi gagner des contrats à l'international.