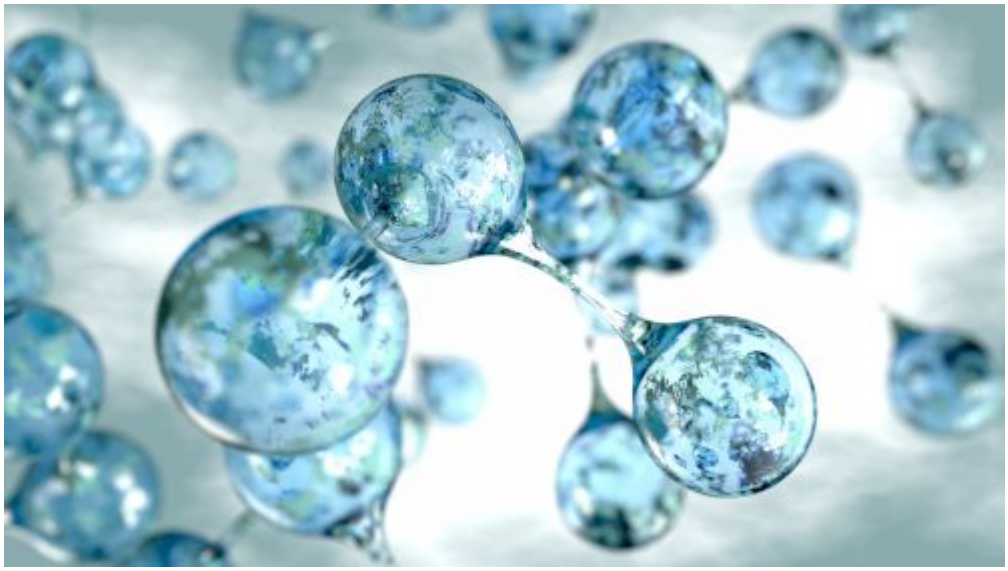


Énergies renouvelables | Hydrogène

Décryptages

Pour atteindre les objectifs de la transition énergétique, la France s'intéresse aujourd'hui à la production et à l'utilisation de l'hydrogène bas-carbone et renouvelable. Utilisé à ce jour essentiellement dans la chimie ou le raffinage, ce vecteur d'énergie pourrait contribuer à décarboner certains secteurs industriels, assurer le stockage de l'électricité ou alimenter le secteur des transports. Le déploiement des technologies hydrogène attend cependant de lever un certain nombre de verrous.

- L'hydrogène : un marché à fort potentiel
- La chaîne de valeur de l'hydrogène
- L'hydrogène dans la transition énergétique
- Quel avenir pour l'hydrogène ?
- L'essentiel sur l'hydrogène



L’HYDROGÈNE : UN MARCHÉ A FORT POTENTIEL

L’hydrogène représente un gros potentiel de diminution de gaz à effet de serre (GES) ainsi qu’une manne économique significative. Les pays européens investissent aujourd’hui de manière conséquente dans ce marché en pleine expansion, à commencer par la France qui en attend **100 000 nouveaux emplois directs** (source : AFHYPAC) et qui a déjà mis en place un certain nombre d’aides (Programme d’investissement d’avenir, soutien à la recherche via l’ANR, accompagnement des PME via la BPI, soutien au déploiement de la mobilité hydrogène via l’Ademe, etc.) et d’une institution (le Conseil national de l’hydrogène). (*Figure 1*).

Figure 1 - Plans nationaux pour l'hydrogène en France

LA CHAÎNE DE VALEUR DE L’HYDROGÈNE

Qu’est-ce que l’hydrogène ?

Comme l’électricité, le dihydrogène H_2 (hydrogène) est principalement **un vecteur énergétique** et non une énergie en tant que telle, car il est produit au moyen d’une réaction chimique à partir d’une ressource primaire.

> Actuellement, pour des raisons économiques, l’hydrogène est issu **à 95 % de la transformation d’énergies fossiles**, dont pour près de la moitié à partir du gaz naturel.

Où se trouve l’hydrogène ?

Les ressources principales permettant de produire le dihydrogène H_2 (que l'on appelle hydrogène par abus de langage) **sont l’eau et les hydrocarbures** (le charbon, le pétrole ou le gaz).

- En effet, chaque molécule d'eau est le fruit de la combinaison entre un atome d'oxygène et deux atomes d'hydrogène, suivant la formule H_2O.
- Les hydrocarbures sont issus de la combinaison d'atomes de carbone et d'hydrogène. C’est par exemple le cas du méthane, constituant principal du gaz naturel dont la formule est CH_4, l’une des combinaisons les plus simples pour les hydrocarbures.

L’hydrogène existe aussi à l’état naturel. Les premières sources naturelles d’hydrogène ont été découvertes au fond des mers dans les années 70 et plus récemment à terre. Si les connaissances concernant l'hydrogène ont fortement progressé ces dernières années, il reste encore à évaluer le potentiel que représente cette ressource pour la transition énergétique : quels volumes existants ? Quelles réserves éventuelles ? Quelles méthodes de production ? De même, la compréhension des mécanismes de formation, de migration et d’accumulation de l’hydrogène dans le sous-sol , qui permettraient de mieux cibler l’exploration, suscitent encore un certain nombre de questionnements. Une production à l’échelle industrielle à l’horizon 2035/2040 nécessite de financer plus lourdement la R&D sur ce sujet.

Lire notre avis d'expert sur l'hydrogène naturel

Comment produit-on l’hydrogène ?

Différentes techniques de production existent :

- le **reformage du gaz naturel à la vapeur d'eau** est la technique la plus répandue. Il s’agit de faire réagir du méthane avec de l’eau pour obtenir un mélange contenant de l’hydrogène et du CO_2. Le CO_2 émis par ce procédé pourrait éventuellement être capté et stocké pour produire un hydrogène décarboné. En lieu et place du gaz naturel, l’utilisation du biométhane (méthane issu de la fermentation de la biomasse) constitue aussi une solution pour produire un hydrogène décarboné ;
- l’**hydrogène peut aussi être produit à partir d’eau et d’électricité, c’est l’électrolyse de l'eau**. L’électrolyseur sépare une molécule d’eau en hydrogène et en oxygène. Cette voie est encore peu répandue car nettement plus coûteuse (2 à 3 fois plus chère que le reformage du gaz naturel) et réservée aujourd'hui à des usages spécifiques, comme l’électronique, qui requièrent un niveau élevé de pureté ;
- la **gazéification** permet de produire, par combustion, un mélange de CO et d’H_2 à partir de charbon (solution qui émet beaucoup de CO_2) ou de biomasse.

Aujourd'hui, 95 % de l'hydrogène est produit à partir d'hydrocarbures (pétrole, gaz naturel et charbon), solution la moins coûteuse. Cependant, ce processus est, hormis pour la pyrolyse, émetteur de CO_2, gaz à effet de serre. Pour produire de l'hydrogène faiblement carboné, trois options s'offrent donc aux industriels : capter le CO_2 émis lors de la production par transformation des énergies fossiles, puis le transporter pour le stocker géologiquement, pyrolyser du méthane et séparer le carbone sous forme solide, enfin, le produire via l'électrolyse de l'eau, l'électrolyse étant opérée à partir d'une électricité peu carbonée fournie par de l'énergie nucléaire, éolienne ou solaire. L'enjeu reste toutefois pour cette dernière option, le coût de ce mode de production, plus onéreux à ce jour que celui du reformage du gaz naturel , même en considérant le surcoût lié au captage du CO_2.

Hydrogène vert, gris, bleu et jaune : de quoi parle-t-on ?

- **L'hydrogène vert** est fabriqué par électrolyse de l'eau à partir d'électricité provenant uniquement d'énergie renouvelable ;
- **L'hydrogène gris** est fabriqué par procédés thermochimiques avec comme matières premières des sources fossiles (charbon ou gaz naturel) ;
- **L'hydrogène bleu** est fabriqué de la même manière que l'hydrogène gris, à la différence que le CO_2 émis lors de la fabrication sera capté pour être réutilisé ou stocké ;
- **L'hydrogène jaune**, plus spécifique à la France, est fabriqué par électrolyse comme l'hydrogène vert mais l'électricité provient essentiellement de l'énergie nucléaire.

L'Ademe a récemment suggéré de changer la terminologie. L'hydrogène qui était jusqu'ici appelé « vert » est désormais appelé « renouvelable », l'hydrogène « gris » devient « fossile », et enfin, les hydrogènes « bleu » et « jaune » sont regroupés sous l'appellation « bas-carbone ».

Une fois fabriqué, cet hydrogène doit être stocké, puis transporté **jusqu'à son lieu de distribution et d'utilisation**.

Comment est stocké l'hydrogène ?

Le dihydrogène possède **une très grande densité massique d'énergie** (1 kg d'hydrogène contient autant d'énergie qu'environ 3 kg de pétrole) mais **une très faible densité volumique**. Il faut le transformer pour pouvoir le stocker dans un volume utilisable.

- en le comprimant à 700 bar : 7 litres d'hydrogène peuvent contenir ainsi autant d'énergie qu'1 litre d'essence ;
- en le liquéfiant pour le comprimer davantage à une température de - 253 °C : 4 litres d'hydrogène liquide équivalent alors à 1 litre d'essence.

Densifier l'hydrogène permet d'opérer à des pressions plus faibles mais réclame plus d'énergie, ce qui le rend plus coûteux.

Les modalités de stockage sont multiples (batteries, stockage massif en cavités salines) selon l'usage

que l’on veut en faire.

Comment se transporte l’hydrogène ?

L’hydrogène est généralement **transporté sous forme comprimée** *via* un réseau de pipelines relativement étendu, avec un total de plus de 4 500 km dans le monde, dont 1 600 km en Europe et 2 500 km aux États-Unis.

Des pays comme le Japon envisagent également d’importer de l’hydrogène, qui serait alors transporté par bateau depuis l’Australie par exemple.

Comment s’utilise l’hydrogène aujourd’hui ?

Actuellement, l’hydrogène a deux utilisations principales : d’une part, il sert de **matière de base pour la production d’ammoniac (engrais) et de méthanol** ; d’autre part, il est utilisé comme **réactif dans les procédés de raffinage des bruts en produits pétroliers, carburants et biocarburants**.

Les usages qu’il est possible d’en faire sont néanmoins nombreux, et l’hydrogène est prometteur pour décarboner un certain nombre de secteurs et accompagner la transition énergétique.

> **Il y avait déjà pensé**
>
> « Oui, mes amis, je crois que l’eau sera un jour employée comme combustible, que l’hydrogène et l’oxygène, qui la constituent, utilisés isolément ou simultanément, fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisables et d’une intensité que la houille ne saurait avoir », **écrit Jules Verne dans son roman L'Île mystérieuse en 1874**.



Figure 2 - Les perspectives de l'hydrogène

L’HYDROGÈNE DANS LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Récupérer de l’énergie à partir du dihydrogène renouvelable ou bas-carbone préalablement stocké se fait de deux façons :

- soit sous forme de chaleur *via* **sa combustion directe avec le dioxygène** ;
- soit sous forme d’électricité *via* **une pile à combustible (PaC)**.

Dans les deux cas la réaction globale ne produit que de l’eau et l’énergie produite peut être

diversement valorisée. L'hydrogène se voit assigner trois objectifs essentiels pour réussir la transition énergétique.

L'hydrogène pour décarboner les transports

En France le transport émet **27 % des émissions de GES globales**, ce qui en fait le premier secteur émetteur. Les enjeux sur la mobilité sont donc considérables, car la solution hydrogène appliquée à la mobilité propre (*power-to-mobility* – *Figure 3*), en utilisant la combustion directe ou la pile à combustible, permet de réduire considérablement les émissions.

L'hydrogène dans les transports : quelques chiffres

Un véhicule diesel produit **entre 40 et 45 tonnes de CO_2** sur l'ensemble de sa durée de vie, un véhicule hydrogène produit par reformage **un peu plus de 35 tonnes**, et un véhicule hydrogène produit par électrolyse renouvelable **moins de 15 tonnes**.

Les voitures alimentées en hydrogène ont au mieux un impact carbone **74 % moindre** que les véhicules thermiques traditionnels (Source : Carnot ARTS).

La voiture à hydrogène

Le moteur à hydrogène

Les caractéristiques physico-chimiques de l'hydrogène en font un bon candidat pour **une utilisation comme carburant** dans un moteur à allumage commandé de type « essence ». Le principal avantage réside dans le bilan environnemental : combinée à l'oxygène, **la combustion de l'hydrogène produit essentiellement de l'eau** et de la chaleur et ne rejette que des oxydes d'azote (NOx). Cependant, cette solution nécessite des adaptations spécifiques pour obtenir un très haut rendement et de très faibles émissions de NOx. Il faut notamment exploiter différentes propriétés de l'hydrogène comme **sa capacité à brûler rapidement en mélange très pauvre**.

L'utilisation de l'hydrogène dans un moteur à combustion interne peut **bénéficier des dernières avancées du moteur thermique et du couplage avec une chaîne de traction hybride**. Ainsi, en se basant sur des technologies plus robustes et matures que celles utilisées actuellement pour les piles à combustible, il serait possible d'atteindre **un rendement supérieur à 50 %**. Ce pourrait être **une solution de transition vers la pile à combustible** puisqu'elle permet de commencer la validation de toute la filière de production et de distribution de l'hydrogène en utilisant les outils industriels de production existants.

>> En savoir plus sur la solution IFPEN de moteur à hydrogène

La pile à combustible dans les voitures électriques

Pour le long terme, les constructeurs automobiles s'intéressent aussi aux piles à combustible (ou Fuel Cell), comme **générateurs d'électricité pour les véhicules électriques**. Ceci afin de compléter les solutions de véhicules électriques à batteries, souffrant aujourd'hui de la limitation en autonomie et du temps de recharge de ces batteries. L'hydrogène sert alors à alimenter une pile à combustible — laquelle produit de l'électricité — pour permettre le fonctionnement du moteur électrique qui fait avancer le véhicule. L'hydrogène est un des meilleurs vecteurs d'énergie pour les piles à combustible aujourd'hui en termes de performances énergétiques et d'émissions. **Leur rendement est globalement supérieur à 50 % sur une large plage de fonctionnement**, ce qui représente un avantage intéressant par rapport à un moteur thermique essence actuel.

Alimentée par un mélange d'air et d'hydrogène, la pile convertit l'énergie chimique de l'hydrogène en énergie électrique **suivant le principe inverse de l'électrolyse**. En faisant réagir de l'hydrogène avec de l'oxygène de l'air sur les électrodes (de fines membranes recouvertes d'un catalyseur, le platine), les piles à combustible permettent de produire de l'électricité **sans autre émission que de la vapeur d'eau**. Le principe date de 1839 ! Il est utilisé depuis longtemps pour produire de l'électricité à bord des fusées.

>> En savoir plus sur la solution IFPEN de pile à combustible

Le train et l'avion à hydrogène

Le plan français en faveur de l'hydrogène compte parmi ses objectifs **la mise en service d'un premier train à hydrogène en France en 2022**. À la suite de l'Allemagne, la France fait ses premiers pas dans la mobilité ferroviaire à hydrogène, SNCF et les Régions ayant lancé **le projet TER H2** qui vise à mettre en place la toute première flotte de trains hydrogène régionaux dans plusieurs régions françaises pilotes.

L'avion à hydrogène ou « avion propre », s'il donne déjà lieu à des projets ambitieux, doit encore répondre à un certain nombre de questions en termes de technologie, d'environnement, et de sécurité.

L'hydrogène pour le stockage d'électricité et son injection dans les réseaux

Le stockage d'énergie sous forme d'hydrogène permet de **pallier l'intermittence des énergies renouvelables** (éolien et solaire) en optimisant la capacité de production électrique (*power-to-power – Figure 3*).

Dans le cadre du développement d'un mix électrique renouvelable, l'électrolyse permet, quand le réseau est excédentaire (c'est-à-dire quand la production d'électricité est supérieure à sa consommation), de stocker de l'hydrogène sur un temps court ou long selon les besoins.
Dans le cas d'un réseau déficitaire au contraire, l'hydrogène disponible **peut être réutilisé dans une pile à combustible pour fabriquer de l'électricité**.

L'hydrogène peut être également injecté directement dans les réseaux de gaz (*power-to-gaz – figure 3*) :

- par injection directe dans les réseaux gaziers pour combustion ;
- par production de méthane de synthèse (selon le principe de méthanation) : conversion du monoxyde (CO) ou du dioxyde de carbone (CO_2) en présence d'hydrogène, qui peut ensuite être transformé en chaleur, électricité ou carburant.

L'hydrogène pour décarboner le secteur industriel

L'hydrogène peut être utilisé dans le secteur industriel (*power-to-industry – Figure 3*) :

- d'une part pour alimenter en énergie décarbonée les unités industrielles concernées ;
- d'autre part pour contribuer à la décarbonation des procédés industriels concernés en substitution des énergies fossiles utilisées actuellement : c'est le cas par exemple de la fabrication d'acier qui résulte de la réduction des minerais de fer. Cette réduction opérée aujourd'hui via le charbon pourrait demain l'être en utilisant de l'hydrogène décarboné.

Le déploiement de l'hydrogène renouvelable est annoncé. Des projets de grande ampleur se montent comme NortH2, plus grand projet de production d'hydrogène vert d'Europe. Objectif : **produire de l'hydrogène vert en utilisant de l'électricité renouvelable** provenant de l'éolien offshore au large des Pays-Bas.

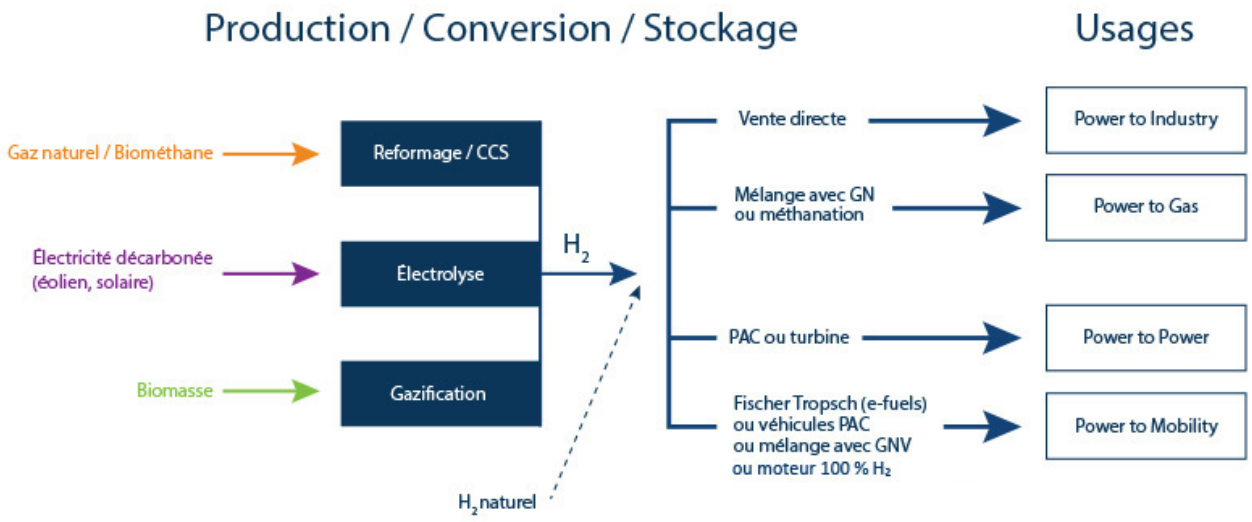


Figure 3 - La chaîne hydrogène simplifiée : de la production aux usages

QUEL AVENIR POUR L'HYDROGÈNE ?

Le déploiement de l'hydrogène décarboné est à envisager d'ici la fin de la décennie, son plein essor étant plutôt pour la suivante. Il nécessite de **lever un certain nombre de verrous**.

Faire baisser les coûts

L’hydrogène vert est très cher et ne pourra se déployer qu’à la condition de réduire les coûts sur l’ensemble de la chaîne de valeur, à commencer par le coût de production de l’électricité renouvelable (solaire, éolien) mais également celui des électrolyseurs ou des piles à combustible.

Combien coûte l’hydrogène décarboné ?

Produire de l’hydrogène à partir de l’électrolyse coûte aujourd’hui **2 à 3 fois plus cher que le vaporeformage et 2 fois plus cher que le reformage avec captage du CO_2**. Cette voie est réservée aujourd'hui à des usages spécifiques comme l’électronique, qui requièrent un niveau élevé de pureté.

La complexité de la chaîne de valeur et les différentes transformations impliquent en outre des cascades de rendement, sources de pertes d’énergie, qui ont pour effet de renchérir les coûts de production.

En parallèle, un prix du CO_2 relativement élevé permettrait de réduire l’écart de coût avec le reformage du gaz naturel. Cependant, **la hausse de la fiscalité carbone doit être progressive** et s’accompagner de politiques publiques de soutien pour les populations les plus démunies.

Construire les infrastructures

Le déploiement de l’hydrogène électrolytique nécessite la mise en place **d’une infrastructure complexe** comprenant, outre des capacités de production alimentées par des énergies renouvelables (fermes éoliennes ou solaires, connectées ou non au réseau électrique), **un réseau de transport et de distribution connectant ces capacités de production aux sites d’utilisation, et un ensemble de capacités de stockage variées** mises également en réseau. Le tout devra être géré par un système intelligent permettant d’optimiser l’adéquation de l’offre et de la demande à phases de temps quotidiennes à temporaires.

Il est en outre nécessaire de mutualiser la construction des infrastructures de captage, de transport et de stockage de CO_2. En Europe, les premiers éléments de cette infrastructure seront opérationnels dès le milieu de la décennie.

Le déploiement des infrastructures de transport et de distribution nécessite des investissements importants et une durée de mise en œuvre relativement longue.

À RETENIR

L’hydrogène bas-carbone et renouvelable représente **un marché à fort potentiel** sur lequel la France se positionne aujourd’hui au moyen d’une stratégie nationale forte et d’importants investissements.

L’hydrogène est **un vecteur d’énergie** qui requiert une chaîne de valeur complexe. Généralement, il est produit à partir d’eau ou d’hydrocarbures, soit **par procédés thermochimiques avec captage du CO_2** émis lors de la fabrication, soit **par électrolyse de l’eau**. Après avoir été stocké et éventuellement transporté, il est

utilisé comme énergie avec **une pile à combustible** ou **par combustion directe**.

Dans le cadre de la transition énergétique, la France vise à étendre l'utilisation de l'hydrogène bas-carbone et renouvelable pour **alimenter le secteur des transports**, pallier l'intermittence des énergies renouvelables **au moyen du stockage d'électricité, et décarboner le secteur industriel**.

Le déploiement des technologies hydrogène dépend encore en grande partie de **la réduction de leurs coûts** et de **la construction d'infrastructures**.

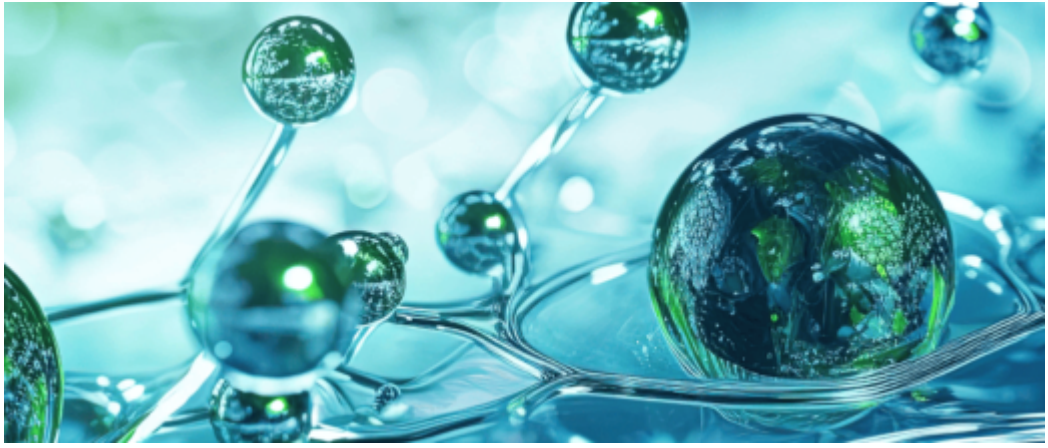


IFPEN :
Nos expertises > Hydrogène

POUR ALLER PLUS LOIN

Entretien sur B Smart avec Yannick Pesson, responsable du programme de recherch…
[VIDEO - Les Echos] L'hydrogène, l'énergie qui va révolutionner l'économie ?
La pré-étude dédiée à l'hydrogène en Europe est disponible
L'AIE entrevoit une place importante pour l'hydrogène décarboné
SUBSTANCE Podcast – Hydrogen (avec Olivier Sissmann)

Fil d'actualités



IFPEN

Actualités avril 2024

Cap sur l’hydrogène naturel : l’AIE et la DGEC confient les rênes à IFPEN



Enjeux et prospective

Actualités janvier 2024

Avis d’expert : l’hydrogène naturel

Hydrogène



Recherche fondamentale

Actualités octobre 2024

A voir : De l’exploration à la modélisation de l'hydrogène naturel et du lithium géothermal

Géothermie Hydrogène

Tout savoir sur l'hydrogène

Lien vers la page web :