

La Boîte à Outils Mixenn 

mixenn

ACCÉLÉRATEUR DE **TRANSITION ÉCOLOGIQUE**
DES TRANSPORTS EN BRETAGNE



l'hydrogène renouvelable



Découvrez le programme
pour plus d'informations
et retrouvez toutes nos
fiches outils

Mise à jour le 20/08/2024

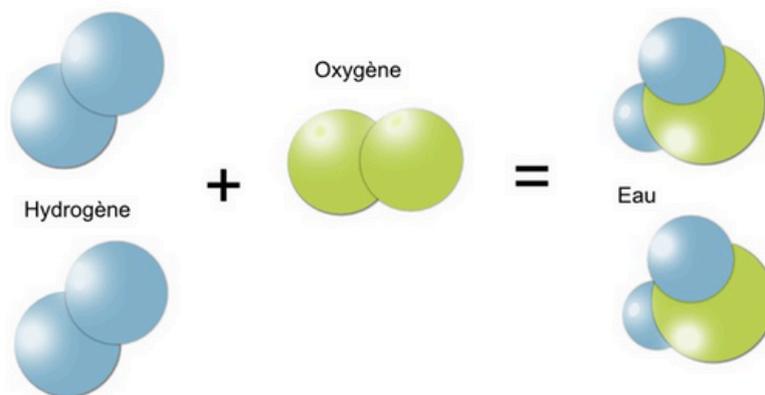
L'hydrogène, un vecteur énergétique émergent pour la mobilité.

L'hydrogène n'étant qu'un vecteur énergétique et non une source d'énergie primaire, son emploi énergétique suppose qu'il soit produit, conditionné, distribué et converti pour être utilisé.

Ainsi utilisé dans une pile à combustible (PAC), l'hydrogène produit de l'électricité. Les véhicules fonctionnant à hydrogène grâce à une PAC sont donc des véhicules électriques, zéro émission, intéressants en raison de leur autonomie et de la vitesse du ravitaillement.

Le développement des véhicules électriques hydrogène vient diversifier l'offre d'électromobilité et répond à des besoins dans la mobilité particulier des véhicules lourds et des usages professionnelle en intensifs.

L'hydrogène, qu'est-ce que c'est ?



L'hydrogène, H₂, est l'élément chimique le plus abondant de l'univers. L'hydrogène est un gaz, inodore, incolore, non toxique, très léger donc très volatil.

Très réactif, voir corrosif, il adore se combiner avec ce qui l'entoure. L'hydrogène est très inflammable dans l'air; sa plage d'inflammabilité est étendue. Il est peu accessible à l'état pur sur terre en grande quantité : **il faut donc le fabriquer**

**L'hydrogène est non carboné.
Sa combustion ne produit ni particule, ni polluant.**



Comment produire de l'hydrogène ?

Pour extraire cet hydrogène et former le gaz dihydrogène, les procédés mis en œuvre sont multiples et nécessitent de l'énergie et des ressources. Il s'agit :

- > **du vaporeformage du gaz naturel**, qui consiste à « casser » la molécule de méthane, à haute température (700 °C) et en recourant à des catalyseurs à base de nickel ;
- > **de l'électrolyse**, qui utilise un courant électrique pour «casser» la molécule d'eau. On distingue plusieurs technologies d'électrolyse qui se développent actuellement, dont l'électrolyse alcaline et PEM (à membrane échangeuse de protons). Pour ce procédé, la source d'énergie utilisée est l'électricité, qui peut être de différente nature (mix réseau, renouvelable, etc.) ;



- > **de la pyrogazéification**, qui décompose de la matière solide, comme du bois ou des bois déchets, sous l'effet de la chaleur, pour en extraire un gaz complexe, dont on peut extraire de l'hydrogène



ADEME, « Développer l'hydrogène renouvelable
CLÉS POUR AGIR et bas carbone » sept.2021



Le défi de la filière ?

Produire massivement de l'hydrogène décarboné ou renouvelable compétitif.



Le vaporeformage, la technique la plus utilisée

Aujourd'hui, l'hydrogène est très majoritairement fabriqué par vaporeformage de gaz fossile et utilisé principalement dans l'industrie lourde (pétrochimie, fabrication d'ammoniac, raffinage d'hydrocarbures...). Le coût de l'hydrogène obtenu par vaporeformage est de l'ordre de 1.5 à 2 €/kg. Une tonne d'H2 produite par vaporeformage produit également 10 à 11 tonnes de CO2, généralement émises dans l'atmosphère.

L'électrolyse, la plus prometteuse

Parmi ces techniques, l'électrolyse est aujourd'hui la plus prometteuse. Même si la part qu'elle représente dans la production mondiale d'hydrogène pur reste aujourd'hui encore largement minoritaire (autour de 1 %).

Ce processus permet d'obtenir de l'hydrogène dit « renouvelable » lorsqu'il exploite une électricité d'origine renouvelable, ou bas carbone lorsqu'il exploite une électricité au contenu très peu carboné. La compétitivité de l'électrolyse, technique fortement consommatrice d'électricité, est notamment dépendante de la baisse progressive du coût de l'électricité, et sera donc particulièrement corrélée à la croissance des énergies renouvelables.

De nombreuses techniques

D'autres techniques de production peu carbonées existent, telles que le processus de gazéification de biomasse.

La biomasse, brûlée dans un réacteur à très haute température (entre 1 200 et 1 500°C) dégage différents gaz qui vont ensuite se séparer et se reformer pour obtenir, d'un côté de l'hydrogène (H2) et de l'autre du monoxyde de carbone (CO).

De nombreuses autres techniques de production d'hydrogène pur sont en cours de développement, telles que la thermolyse de biomasse, la photoélectrocatalyse, ou la gazéification d'eau supercritique. Cependant, aucune de ces techniques n'est proche à court terme de rattraper le niveau de maturité commerciale dont disposent les électrolyseurs.



Une ordonnance du 17 février 2021 relative à l'hydrogène définit l'hydrogène renouvelable, bas-carbone et carboné.



	Hydrogène renouvelable	Hydrogène bascarbone	Hydrogène carboné
Définition (ordonnance N°2021-167 2021)	<i>“L'hydrogène renouvelable est l'hydrogène produit soit par électrolyse en utilisant de l'électricité issue de sources d'énergies renouvelables telles que définies à l'article L. 211-2, soit par toute une autre technologie utilisant exclusivement une ou plusieurs de ces mêmes sources d'énergies renouvelables et n'entrant pas en conflit avec d'autres usages permettant leur valorisation directe. Dans tous les cas, son procédé de production émet, par kilogramme d'hydrogène produit, une quantité d'équivalents dioxyde de carbone inférieure ou égale à un seuil.”</i>	<i>“L'hydrogène bascarbone est l'hydrogène dont le procédé de production engendre des émissions inférieures ou égales au seuil retenu pour la qualification d'hydrogène renouvelable, sans pouvoir, pour autant, recevoir cette dernière qualification, faute d'en remplir les autres critères.”</i>	<i>“L'hydrogène carboné est l'hydrogène qui n'est ni renouvelable, ni bas-carbone.”</i>
Émissions de CO2 dégagées par la production d'1 kg d'hydrogène – SourceAdeme	<i>1,9 kg de CO2 par kg d'hydrogène produit</i>	<i>≤3 kg de CO2 par kg d'hydrogène produit</i>	<i>Environ 11 kg de CO2 par kg d'hydrogène produit (vaporeformage de gaz naturel).</i>
Estimation du coût de production actuel	<i>Sup à 9 €/kg</i>	<i>Entre 4.5 et 6 €/kg en 2020</i>	<i>Entre 1.5 et 2 €/kg (selon les cours du gaz naturel et du CO2)</i>

Ressource // 17 février 2021 ordonnance N°2021-167 2021
<https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043148001>





Bénéfices environnementaux



Véhicules silencieux



-70%

Du puits à la roue* sous réserve que l'hydrogène soit d'origine renouvelable

*Analyse ACV Ademe



Vignette Verte Véhicule
zéro émission à l'échappement 0 NO_x

Une étude d'Analyse du Cycle de Vie publiée par l'ADEME en décembre 2020 révèle des écarts considérables.

L'hydrogène fabriqué avec de l'électricité d'origine renouvelable n'émet que 1,6 kg de CO₂ pour 1 kg produit. Mais 2,8 kg si on utilise l'électricité du mix électrique français (on parlera alors d'hydrogène bas carbone) et presque 20 kg si l'on a recours au mix électrique moyen européen.

Si cet hydrogène est renouvelable ou bas carbone, alors les réductions de gaz à effet de serre seront au rendez-vous. Soit entre 75 % et 69 % de réduction par rapport au véhicule équivalent diesel, sur l'ensemble du cycle de vie, comprenant la fabrication du véhicule, la production d'hydrogène ou de carburant ainsi que la fin de vie des équipements.



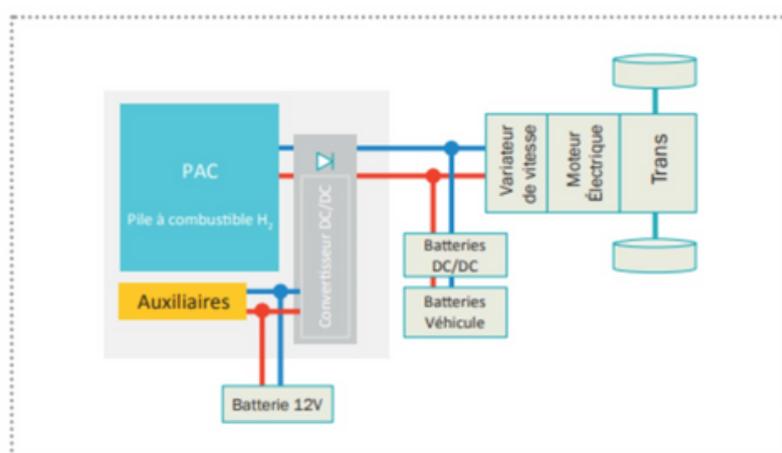
Source : *Changement climatique et énergie / Analyse de cycle de vie relative à l'hydrogène*
<https://bibliothèque.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/4213-analyse-de-cycle-de-vie-relative-a-l-hydrogene.html>



Un véhicule hydrogène à PAC, comment ça fonctionne

La pile à combustible (PAC) permet la transformation de l'énergie chimique (dihydrogène) en énergie électrique. La PAC requiert un hydrogène pur pour son fonctionnement.

VÉHICULE ÉLECTRIQUE À PILE À COMBUSTIBLE PLEINE PUISSANCE



Un véhicule à pile à combustible est essentiellement conçu autour des composants suivants :

- Un stockage d'hydrogène sous pressions, le plus généralement 700 bars pour les véhicules légers les plus récents et 350 bars pour les bus
- Une pile à combustible (PAC) de type PEM
- Un système de stockage d'électricité fonctionnant en parallèle avec la pile (batterie ou super capacités)
- Un moteur entraînant les roues
- Un compresseur d'air (les piles fonctionnent avec de l'air à une pression comprises entre 1,2 et 3 bars absolus)
- Des échangeurs de chaleur et un radiateur pour évacuer la chaleur produite par la pile
- Divers composants spécifiques : pompes, capteurs, séparateurs, convertisseur contrôle-commande...

Les véhicules embarquent un réservoir stockant de l'hydrogène comprimé qui est transformé en électricité via une pile à combustible pour alimenter le moteur électrique, généralement en association avec une batterie. La pile à combustible transforme l'hydrogène et l'oxygène en eau, générant ainsi un courant électrique selon la formule chimique $2H_2 + O_2 \Rightarrow 2H_2O$

La pile à combustible génère de l'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène, réaction qui ne rejette que de l'eau. Un véhicule alimenté par un hydrogène vert (produit de manière décarbonée) a donc un bilan carbone bien inférieur à un véhicule à combustion.



Applications de la pile à combustible dans le transport terrestre

https://s3.production.france-hydrogene.org/uploads/sites/4/2021/11/Fiche_209.1_20-20PAC_20dans_20le_20transport_20terrestre_20r_C3_A9v_20mars_202020_20-20ThA.pdf





Les moteurs thermiques à hydrogène

L'utilisation de l'hydrogène dans un moteur à combustion interne représente une piste prometteuse pour la mobilité lourde et une alternative moins onéreuse à la pile à combustible. Ce modèle est actuellement à l'étude au sein de [L'IFPEN](#) et de certains équipementiers du secteur.

Le moteur thermique (ou moteur à combustion interne) peut, dans son principe fonctionner à l'hydrogène pour produire de l'énergie mécanique. Les performances environnementales étant intéressantes (absence de CO₂) mais limitées (émissions de NO_x), il est nécessaire d'ajouter un système de dépollution.



L'offre véhicule en développement

Les véhicules reconditionnés : le retrofit électrique

Le retrofit consiste à convertir un véhicule thermique en un véhicule électrique à batterie ou à pile à combustible (hydrogène). L'arrêté relatif aux conditions de transformation des véhicules a été publié le 13 mars 2020. Il permet à des véhicules en service depuis au moins 5 ans et conçus à l'origine pour fonctionner avec une motorisation thermique, de fonctionner en motorisation électrique.



Source - Ademe

Véhicules neufs : les constructeurs automobiles s'engagent



- Hyundai (Nexo, 700 km autonomie, Conso moyenne : 0.95 kg/100 KM)
- Toyota (Mirai, 650 km autonomie soit en moyenne 0.84 à 0.89kg/100 km) ;
- Mercedes (GLC F-Cell, Capacité du réservoir hydrogène 4.4 Autonomie H2 en mode hybride 437 km.



Consommation : 1 kgH₂ pour 100 km en véhicule léger



Tableau comparatif

	Véhicule électrique à batterie BEV	Véhicule électrique à pile à combustible FCEV
Autonomie actuelle	300km	800km
Ravitaillement	Entre 1h et 10h	4 à 5 minutes
Poids de la batterie / PAC	300kg	150kg
Rendement du puit à la roue	Env. 70%	Env. 30%
Utilisation de métaux rares	Lithium, Nickel & Cobalt	Platine
Prix à l'achat hors aides	A partir de 25K €	A partir de 70K €

Véhicules utilitaires légers



- Mercedes Renault (Kangoo 370 km autonomie, utilitaire électrique à prolongateur d'autonomie à hydrogène) (été 2022, Renault Master fourgon, châssis cabine ou minibus 350 km d'autonomie contre 120 km en électrique)
- Stellantis (utilitaires Peugeot Expert 440 km d'autonomie et Opel Vivaro fin 2021)
- VW

L'hybridation des véhicules électriques est possible. La faible autonomie des BEV est alors complétée par un prolongateur d'autonomie à hydrogène. L'entreprise française Symbio développe ce type de prolongateur qui équipe les véhicules Renault Kangoo ZE Hydrogen.

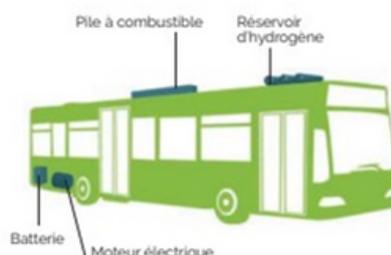
Transports voyageurs



choix : 5 modèles pour 4 constructeurs (SAFRA (France), SOLARIS (Pologne), TOYOTA & Caetano, VAN HOOL.

Autonomie 300 à 400 km

SCHÉMA DE BUS ÉLECTRIQUE À HYDROGÈNE



Bennes à ordures ménagères (BOM)

Trois constructeurs se positionnent : E-trucks Europe, PVI (Groupe Renault) et SEMAT.

Engins



Un usage en entrepôt logistique ou en site portuaire se développe

Chariots élévateurs : Fenwick Linde, STILL, Jungheinrich, Plug Power, tracteurs de parc (Gaussin)

Remorques frigorifiques



La semi-remorque à hydrogène ROAD (usage d'une pile à combustible pour alimenter le groupe froid) est développée par Chéreau.

Le prototype a été testé en conditions réelles par le transporteur Malherbe. Le tracteur dispose d'une motorisation diesel classique et la semi-remorque frigorifique est alimentée en H2.

Poids lourds



A date : pas d'offre commercialisée en tracteur de nombreuses annonces et développement :

- Gaussin, Daimler, Hyundai XCIENT Fuel Cell (400 km, USA / Suisse),
- Hyzon Motors (USA), Iveco / Nikola (1200km, 2022-2023),
- MAN (prototype 2021, premiers tests 2023),
- Mercedes GenH2 (hydrogène liquide, 1000 km, série en 2025),
- PACCAR (550 km, USA),
- Scania, Volvo Trucks-Daimler (2025)...



France Hydrogène - Quelles perspectives pour le poids lourd électrique à hydrogène pour le TRM ?

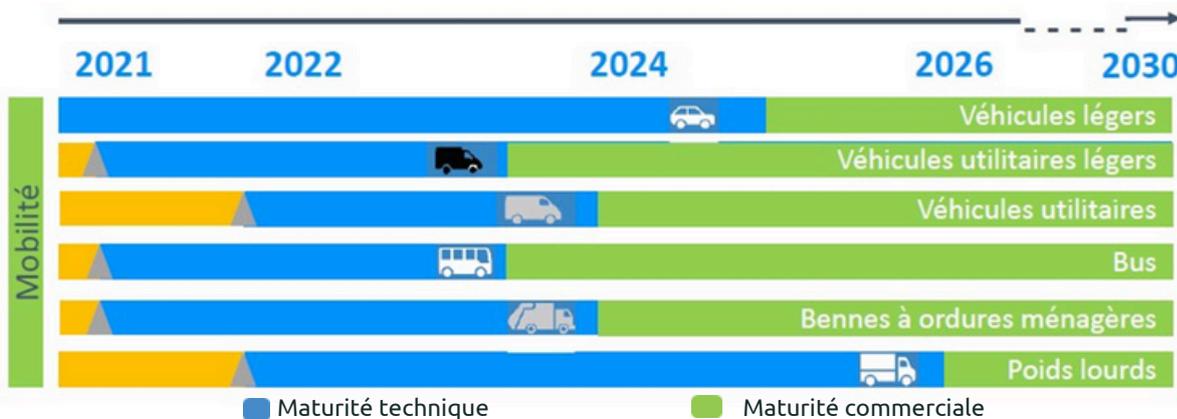


France Hydrogène - Quelles perspectives pour le poids lourd électrique à hydrogène pour le TRM ?

L'hydrogène apparaît comme une solution plus réaliste à l'horizon 2030 dans le secteur du transport lourd. Plusieurs conditions détermineront l'apparition d'un modèle économique à l'horizon 2030.

Synthèse sur la mobilité

Horizon de déploiement commercial de l'hydrogène pour différentes applications de mobilité :



France Hydrogène - Quelles perspectives pour le poids lourd électrique à hydrogène pour le TRM ?

Les industriels français sont présents sur tout la chaîne de valeur de l'hydrogène.

- Sur le segment des véhicules, McPhy, Elogen (ancien Areva H2Gen) et Genvia pour les électrolyseurs; Symbio (joint-venture entre Michelin et Faurecia), Héliion (rachetée par Alstom) et Pragma
- Pour la mobilité et les piles à combustible SAFRA
- Pour les bus : Plastic Omnium et Faurecia pour les réservoirs; Ataway, McPhy et HRS pour les stations-service; Alcrys, Ad-Venta pour la connectique



Des progrès technologiques demeurent également nécessaires car la pile à combustible n'a qu'un potentiel de roulage de 7 000 heures, loin des besoins pour le transport routier, où la durée de vie minimale doit dépasser 30 000 heures.



Les tunnels

L'autorisation des véhicules à hydrogène à circuler dans les tunnels ou à stationner dans un parking souterrain doit également être expertisée.
Conseil assurance : veillez à assurer le risque hydrogène dans la mobilité.



Les discussions se poursuivent entre les experts de l'Afhypac et les administrations concernées afin de traiter la question de la présence de véhicules à hydrogène dans les parcs souterrains de stationnement (actuellement le stationnement de véhicules à hydrogène dans les parcs souterrains n'est pas interdit : la Sécurité civile recommande simplement d'éviter de le faire) et dans les tunnels (CETU). Il n'y a pas en France de réglementation sur la circulation de véhicules à hydrogène dans les tunnels; mais leur usage ne fait pas anticiper de difficulté particulière.



Les ressources utiles pour aller plus loin

- [Panorama des solutions hydrogène](https://www.afhypac.org/presse/panorama-des-solutions-hydrogene-3545/) – France Hydrogène, oct. 2021, 160 p. <https://www.afhypac.org/presse/panorama-des-solutions-hydrogene-3545/>
- <https://vigny.france-hydrogene.org/>
- France hydrogène <https://www.afhypac.org/>
- Académie des sciences <https://www.connaissancesdesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/Rapport%20H2%20Final.pdf>



Pour le marché de la mobilité, le défi consiste à développer simultanément la production d'hydrogène renouvelable à un coût compétitif, à déployer un réseau de distribution proche des utilisateurs, et à créer une offre de véhicules et de piles à combustible.

Étant donné la demande encore limitée et les volumes restreints, les prix actuels d'un kilo d'hydrogène décarboné ou d'un véhicule à hydrogène sont de 3 à 4 fois supérieurs à ceux de leurs équivalents traditionnels.

La pénurie d'opérateurs qualifiés et les technologies en jeu sont à différents stades de maturité. Si certaines sont déjà commercialisées, aucune n'a encore atteint une maturité suffisante, ce qui explique des coûts encore élevés.

Le coût du kilo d'hydrogène distribué dépend du modèle de production, du transport et de la distribution. Actuellement, un camion à hydrogène coûte environ 450 000 €, contre 90 000 € pour un camion diesel et 120 000 € pour un camion au gaz naturel, la différence de prix étant principalement due au coût de la pile à combustible.

Les coûts

Du fait de la nature même de la molécule (petite, volatile, réactive, inflammable), il est nécessaire d'étudier de près les CAPEX et OPEX des solutions. La filière s'attend à une baisse importante des CAPEX sous 3 ans. Quant à la maintenance / exploitation, les opérateurs qualifiés sont encore rares sur le marché.

Analyse de la pertinence et des principales caractéristiques technico-économiques des véhicules à PAC selon les modes de transport et solutions concurrentes associées

Comparaison	Véhicules particuliers		Véhicules utilitaires légers		Bus		Poids-lourds		Rail		Navires	
	Pi batteries	Pi thermique	Pi batteries	Pi thermique	Pi batteries	Pi thermique	Pi batteries	Pi thermique	Pi batteries	Pi thermique	Pi batteries	Pi thermique
Autonomie	++	=	++	=	++	=	+	=	++	=	-	++
Vitesse de recharge	++	=	++	=	++	=	=	=	++	=	-	NA
Pollutions atmosphériques	=	++	=	++	=	++	+	++	=	++	-	++
TCO actuel VS référence *	+80/100%		+40/60%		+60/80%		+80/100%		+10/20%		+50%	
TCO à maturité VS référence *	+20/40%		-5%/+0%		+10/15%		+0/5%		-20/+0%		-	
Technology Readiness Level (TRL)	9		8		8		6-7		7		5-6	
Horizon de maturité technologique	2010-2015 Technologie éprouvée et testée dans le monde entier.		2010-2015 Véhicules utilisés principalement aux États-Unis. Concepts et prototypes principalement pour les petits camions.		2010-2015 Technologie éprouvée et testée dans de nombreuses flottes dans le monde entier.		~2022 Plus de 11 000 véhicules de manutention à PAC en Amérique du Nord. Flottes de démonstration en Europe ; prototypes au Japon.		~2020 Projets de démonstration de véhicules légers sur rail.		~2022 L'utilisation de piles à combustible pour la production d'énergie embarquée est à l'essai.	
Horizon de maturité commerciale	2020-2025 Durée de vie ~8-10 ans Des politiques incitant à l'achat restent nécessaires		2020-2025 Durée de vie ~18 ans		2020-2025 Durée de vie ~10-15 ans		2020-2025 Durée de vie ~10-15 ans		2025-2030 Durée de vie ~40 ans		2030 : navires à passagers 2050 : navires de marchandises Durée de vie >25 ans	
Conditions critiques d'adoption	<ul style="list-style-type: none"> Comparabilité aux ICE (portée/performance) Infrastructure de recharge assez développée 		<ul style="list-style-type: none"> Stockage de l'hydrogène peu encombrant Réduction du coût total de possession Fiabilité de l'approvisionnement 		<ul style="list-style-type: none"> Flexibilité et fiabilité d'utilisation dans les services réguliers avec des temps d'arrêt courts Peu de restrictions d'espace et de poids pour le transport de passagers 		<ul style="list-style-type: none"> Approvisionnement en hydrogène (dans certains cas à l'extérieur) pour les parcs de véhicules plus importants Possibilité d'utilisation sur plusieurs quarts de travail 		<ul style="list-style-type: none"> Approvisionnement suffisant et fiable en hydrogène 		<ul style="list-style-type: none"> Faibles émissions combinées à des prix bas pour les groupes motopropulseurs et les carburants 	

++ Comparaison avec véhicules à batteries (sauf poids lourds : GNV)
+ Comparaison avec véhicules à moteur thermique (essence / diesel)

Source : Analyses EY d'après Hydrogen Council, FCH 2 JU.

* Les TCO des véhicules à pile à combustible sont comparés aux motorisations « de référence » à l'heure actuelle pour les types de véhicules considérés. De manière générale, la motorisation de référence est le moteur thermique.



Ademe - Hydrogène : analyse des potentiels industriels et économiques en France



mixenn.bzh



@Mixenn



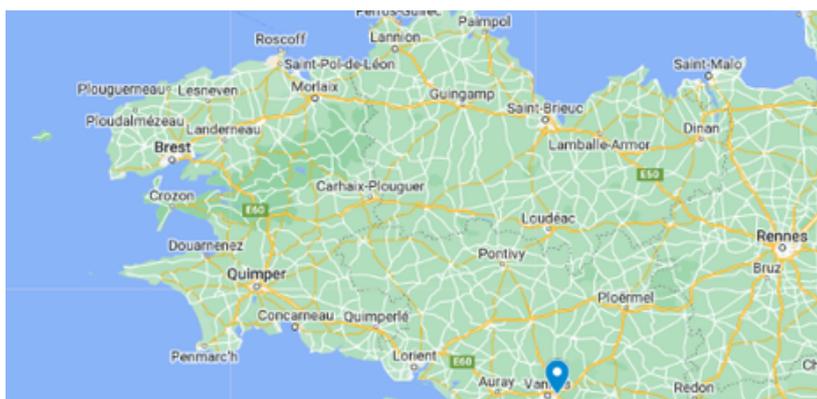
Où faire le plein ?

La mise en place et le maintien d'un réseau d'infrastructures de recharge et d'avitaillement est un enjeu majeur pour le développement des carburants alternatifs. Le réseau de stations Hydrogène s'amorce en France.

Le site Vihy (<https://vihy.france-hydrogene.org/cartographie-des-projets-et-stations/>) France propose une cartographie des stations et des projets. Les coûts observés sont variables d'une station à une autre, et sont actuellement pour les premiers déploiements en France de l'ordre de 8 à 14 €/kgH2 à la pompe. (source AFHYPAC, 2019).

En Bretagne, la première station hydrogène bretonne est en service à proximité du site de Michelin à **Vannes** portée par Morbihan Energies, Engie et Hygo depuis début 2024.

Des stations en projet à : Saint-Brieuc, Lorient, Quimper-Briec, Redon, Chartres-de-Bretagne, Saint-Malo...



Retrouvez la carte sur

<https://mixenn.bzh/energies-alternatives/les-stations/>

Les stations de distribution d'hydrogène doivent soit être alimentées – par camions actuellement, éventuellement par gazoduc à terme – soit produire hydrogène par électrolyse.

BDI (Bretagne Développement Innovation) tient à jour une carte des production-distribution d'hydrogène renouvelable en Bretagne ainsi qu'un annuaire des acteurs bretons de l'hydrogène.



Consultez la carte dynamique et l'annuaire des stations sur [BDI](#).



mixonn

ACCÉLÉRATEUR DE **TRANSITION ÉCOLOGIQUE**
DES TRANSPORTS EN BRETAGNE



Découvrez le programme
pour plus d'informations
et retrouvez toutes nos
fiches outils

Avec le soutien de



Direction régionale de l'aménagement,
de l'urbanisme et du logement



Chargeurs
Pointe de
Bretagne



Animé par