



# L'hydrogène dans la transition énergétique

Février 2016

## Contenu

Enjeux.....	1
Description.....	2
Un atout pour décarboner les différents modes de transports.....	3
L'hydrogène, vecteur de valorisation et d'intégration des EnR dans les réseaux .....	4
Les défis de la filière hydrogène.....	5
Actions de l'ADEME .....	6
Avis de l'ADEME .....	7

## Enjeux

Dans le cadre de ses engagements en faveur de la lutte contre le dérèglement climatique et afin de réduire sa dépendance aux énergies fossiles, la France s'est fixée l'objectif d'aller vers un modèle énergétique plus sobre en CO<sub>2</sub>, fondé sur la maîtrise de la demande d'énergie et l'accroissement de la production d'électricité, de chaleur et de carburants à partir de sources renouvelables.

S'il est aujourd'hui majoritairement produit à partir de gaz naturel et employé comme composant chimique dans des procédés industriels, l'hydrogène présente un intérêt pour ses qualités de vecteur énergétique. En effet, lorsqu'il est produit à partir de ressources renouvelables, il permet de fournir de l'électricité et de la chaleur pauvres en CO<sub>2</sub>. Les progrès techniques réalisés ces dernières années dans la filière hydrogène pour des utilisations à des fins énergétiques et les défis de la transition énergétique créent des conditions favorables au développement de ce vecteur énergétique.

Cet avis présente les enjeux de l'utilisation du vecteur hydrogène dans les secteurs du transport et du stockage d'énergie à des fins de valorisation des énergies renouvelables. Les usages stationnaires du vecteur hydrogène et des piles à combustible (ex : alimentation en chauffage ou électricité d'un bâtiment) ne sont pas abordés.

## En résumé

- L'hydrogène produit à partir de ressources renouvelables peut apporter une contribution importante à la transition vers un modèle énergétique décarboné, notamment dans les secteurs du transport et du stockage d'énergie
- dans le secteur du transport, l'hydrogène est une solution d'ores et déjà disponible pour accompagner le développement de l'électromobilité
- le processus d'industrialisation déjà engagé doit se poursuivre pour permettre la baisse des coûts de certains composants et le développement d'innovations de produits et de services
- le déploiement de l'hydrogène énergie doit se faire dans une logique de mise en adéquation entre les besoins en énergie des consommateurs et les ressources renouvelables d'un territoire

## Description

Elément chimique (H) est très abondant sur terre, mais le dihydrogène (H<sub>2</sub>) existe peu à l'état naturel et doit donc être produit grâce à différents procédés : vaporeformage<sup>1</sup> de gaz naturel ou de biogaz, électrolyse<sup>2</sup> de l'eau, gazéification de la biomasse, décomposition thermochimique ou photochimique de l'eau, production biologique à partir d'algues ou de bactéries. Il peut être ensuite utilisé dans différents usages énergétiques, par exemple pour alimenter un moteur thermique sous forme de mélange avec du GNV ou tout autre usage habituellement dévolu au gaz naturel ou directement pour alimenter une pile à combustible<sup>3</sup> qui fournit de l'électricité.

Le gaz hydrogène (H<sub>2</sub>) est très majoritairement fabriqué par vaporeformage de gaz naturel, procédé de fabrication le plus mature et économique à ce jour, mais qui présente l'inconvénient de recourir à une énergie fossile et d'émettre des gaz à effet de serre<sup>4</sup>. Il doit ensuite être acheminé de son point de production à l'utilisateur final, ce qui nécessite des infrastructures de transport, de stockage et de distribution adaptées.

	Vaporeformage de gaz naturel	Vaporeformage de biogaz	Electrolyse alcaline	Electrolyse à membrane (PEM)	Production biologique
<b>Type d'installation</b>	Centralisée >100 000 tH <sub>2</sub> /an	Décentralisée < 200 tH <sub>2</sub> /an	Décentralisée <200 tH <sub>2</sub> /an	Décentralisée <200 tH <sub>2</sub> /an	Décentralisée
<b>Energie et/ou matières premières</b>	Gaz naturel, eau	Biogaz ou biométhane, eau	Electricité, eau	Electricité, eau	Lumière, eau
<b>Maturité industrielle</b>	Procédé industriel	Procédé en cours d'industrialisation	Procédé industriel	Procédé en cours d'industrialisation	Procédé au stade laboratoire

<sup>1</sup> Procédé de dissociation de molécules carbonées en présence de vapeur d'eau et de chaleur.

<sup>2</sup> Procédé de décomposition de molécule d'eau à partir d'électricité, comprenant un électrolyte de type alcalin ou membranaire (PEM)

<sup>3</sup> Convertisseurs électrochimiques qui produisent de l'électricité et de la chaleur par oxydation d'un carburant et réduction d'oxygène

<sup>4</sup> Voir aussi la feuille de route ADEME « [Hydrogène énergie et piles à combustible](#) »

## Un atout pour décarboner les différents modes de transports

Le secteur des transports représente aujourd'hui 30% de la consommation d'énergie finale et 27% des émissions de GES en France<sup>5</sup>. Le secteur routier dépendant encore très fortement des hydrocarbures, le déploiement de véhicules consommant des carburants alternatifs (électricité, gaz) présente un enjeu particulier qui nécessite la mise en place de nouvelles infrastructures. L'hydrogène présente l'intérêt d'une énergie complémentaire aussi bien pour des véhicules à combustion interne que pour des véhicules électriques.

L'hydrogène peut alimenter certains véhicules équipés de moteur à combustion interne fonctionnant au gaz, comme les bus ou les bennes à ordures ménagères. Les développements actuels portent sur une utilisation de l'hydrogène produit à partir de ressources renouvelables en mélange avec du gaz naturel véhicule (GNV), pouvant aller jusqu'à 20% en volume (Hythane®). Pour un bus utilisant ce type de carburant, sur un cycle urbain, cette option permet de réduire les gaz à effet de serre à l'échappement de 8%. Même si la combustion de ce carburant émet des oxydes d'azote (NOx), polluants de l'air, c'est une voie qui peut s'avérer intéressante dans le cas de l'injection d'hydrogène dans les réseaux de gaz naturel (voir paragraphe suivant).

L'hydrogène peut également alimenter directement une pile à combustible intégrée dans des véhicules électriques. La pile est généralement associée à une batterie, l'ensemble apportant à la fois la puissance et l'énergie nécessaires à l'usage du véhicule. Il existe différentes conceptions de véhicules électriques à hydrogène, avec des degrés d'hybridation variables entre pile et batterie, selon que la pile est employée comme prolongateur d'autonomie ou comme élément de puissance<sup>6</sup>. En effet, le système pile et stockage d'hydrogène possède des atouts en termes d'encombrement : (volume et masse rapportés à la quantité d'énergie embarquée) complémentaires aux caractéristiques des batteries.

L'usage de l'hydrogène pour accompagner l'électrification des différents modes de transports recouvre tous les secteurs et de nombreux

développements sont en cours dans les domaines routier (véhicules utilitaires, poids lourds, bus), de la logistique (engins de manutentions, chariots) et du transport fluvial et maritime (navettes, bateaux). Comme pour le véhicule électrique à batterie, le développement de véhicules électriques à hydrogène est particulièrement pertinent dans les zones urbaines confrontées à des problématiques de qualité de l'air et de nuisances sonores. L'utilisation d'hydrogène ne génère sur le lieu de sa consommation ni émissions de polluants, ni bruit.

Le rendement énergétique global du vecteur hydrogène appliqué à la mobilité – rendement global du « puits à la roue » - est de l'ordre de 20% si l'hydrogène est produit à partir d'une source renouvelable. Il est du même ordre de grandeur que celui des véhicules thermiques (de 10 à 30% selon les types d'usage) mais nettement inférieur à celui des véhicules électriques à batterie seule (de l'ordre de 30% à partir de l'électricité réseau et supérieur à 70% à partir d'une source électrique renouvelable)<sup>7</sup>. Des analyses environnementales et analyses de cycle de vie sont à poursuivre pour prendre en compte les expérimentations de terrain. Les notions d'usage, à l'échelle d'un parc de véhicule par exemple, et de service rendu, pour le réseau électrique notamment, sont à considérer.

Les véhicules électriques intégrant une pile à combustible alimentés à l'hydrogène sont une solution adaptée pour des niveaux de services supérieurs ou des profils d'usage plus exigeants que ceux auxquels répondent aujourd'hui les véhicules électriques à batterie seule. En effet, la pile à combustible alimentée en hydrogène apporte un service supplémentaire et permet de desserrer certaines contraintes :

- Autonomie énergétique supérieure : l'ajout d'une pile peut permettre d'embarquer plus

<sup>7</sup> Sources:

Agence internationale de l'Énergie, [roadmap hydrogen and fuel cells](#), 2015

JRC, [Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context](#), 2014

ADEME, [Elaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et des véhicules thermiques](#), nov 2013

ADEME, Evaluation environnementale du vecteur hydrogène appliquée à la mobilité, juillet 2013

<sup>5</sup> MEDDE, [Panorama Energies-Climat, édition 2015](#)

<sup>6</sup> Cf [Position technique de la filière automobile sur l'hydrogène et les piles à combustible](#), nov 2015

d'énergie (kWh) ou de puissance (kW) ce qui confère une autonomie supérieure au véhicule électrique et offre la possibilité d'alimenter des équipements à bord (par exemple, le chauffage de l'habitacle, la réfrigération)

- Maintien de la charge utile du véhicule (en particulier pour les poids lourds), qui est généralement amoindrie par le poids important des batteries,
- Plus grande disponibilité du véhicule : le remplissage d'un réservoir d'hydrogène s'opère en quelques minutes, rendant le véhicule électrique quasi immédiatement disponible dans le cas de contraintes fortes sur la recharge des batteries (cycles d'usage rapprochés, disponibilité des bornes de recharge électrique). Cela représente un avantage important en permettant d'une part, de réduire la taille d'un parc de véhicules, grâce à la limitation des immobilisations liées à la recharge des batteries, et d'autre part cela limite les besoins en points de recharge des batteries.

L'hybridation d'une pile et d'une batterie est ainsi une option technique intéressante dans le panel des solutions d'électromobilité, pouvant contribuer au développement à plus grande échelle de la mobilité électrique, tout spécialement dans le cadre de services (mobilité, transport de marchandises).

Enfin, l'utilisation de l'hydrogène dans les véhicules électriques peut faciliter la gestion du réseau électrique. En effet, l'augmentation du nombre de véhicules électriques à batterie pourrait générer de plus grandes sollicitations du réseau du fait des besoins de recharge. L'hydrogène constitue alors un moyen supplémentaire ou alternatif de recharge de ces véhicules, offrant ainsi une flexibilité accrue pour la gestion du réseau électrique. En effet, le procédé d'électrolyse permet de produire de l'hydrogène à partir d'électricité, lorsque par exemple celle-ci est abondante et décarbonée, l'hydrogène étant ensuite stocké en station. L'hydrogène peut alors être introduit dans le réservoir des véhicules à la demande et permet la recharge de la batterie sans sollicitation du réseau électrique.

Les véhicules électriques hydrogène présentent encore un surcoût par rapport aux véhicules thermiques et aux véhicules électriques à batterie seule, compte tenu du coût actuel élevé de la technologie pile à combustible. Toutefois, une analyse prospective en coût global pour

l'usager, basée sur une pré-industrialisation de la technologie pile à combustible, montre que des solutions sont économiquement acceptables à moyen terme pour certaines flottes captives de véhicules<sup>8</sup>.

L'équilibre économique de la mobilité hydrogène repose également sur le développement de stations de recharge de capacité faible à moyenne (10 à 80 kg H<sub>2</sub>/j, 350 bars), mutualisées entre gestionnaires de flottes et délivrant de l'hydrogène aux alentours de 10 €/kg<sup>9</sup>. Pour des marchés de flottes professionnelles captives (transport de marchandises, livraison, engins de manutention, véhicules spéciaux, etc), la mise en place de ce type d'infrastructure est concevable à court ou moyen terme, sur la base de stations dédiées. Plusieurs collectivités ont ainsi adopté des plans de déploiement de stations sur leur territoire pour ce type de flotte<sup>10</sup>. Pour les véhicules particuliers, le maillage du territoire national (voire européen) par des stations est un préalable au développement de ce marché. Cette contrainte rend ce marché plus incertain et dépendant des politiques publiques, des choix industriels et des modèles économiques à venir.

## L'hydrogène, vecteur de valorisation et d'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux

La majorité des ressources d'électricité renouvelables fournissent de l'électricité de façon variable, il est ainsi nécessaire, dans une optique d'augmentation de leur part dans le mix électrique, de mettre au point des technologies de stockage. Dans le cas de l'électricité, la conversion de l'électricité renouvelable en hydrogène, molécule stockable, est une possibilité techniquement viable. L'hydrogène est particulièrement important pour assurer un stockage de longue durée, en complément des technologies de stockage de courtes et moyennes durées (stations de transfert d'énergie par pompage – STEP, stockage électrochimique). Et notamment dans le cas d'une part importante de ressources renouvelables dans le mix

<sup>8</sup> [Etude « H<sub>2</sub> Mobilité France » coordonnée par l'AFHYPAC, 2014](#)

<sup>9</sup> Coût cible incluant l'amortissement de l'investissement (100 k€ à 1 M€, en fonction de la capacité journalière et des fonctionnalités)

<sup>10</sup> <http://www.symbiofcell.com/sations-villes-france/>

électrique avec des besoins de stockage sur des durées excédent les 12 heures quand les autres moyens sont saturés, et pour le déploiement de stockage inter saisonnier à grande échelle.

Le stockage stationnaire d'hydrogène nécessitant des investissements importants, le principe de conversion d'électricité en hydrogène stockable et injectable dans les réseaux existants de gaz naturel, appelé le « *power-to-gas* », est une solution prometteuse. Deux voies sont particulièrement étudiées :

- la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau<sup>11</sup>, ensuite mélangée au gaz naturel et injectée dans le réseau de gaz. Actuellement, un taux d'incorporation de 6 % en volume est possible par la réglementation et les pratiques commerciales en vigueur, des travaux sont menés pour aller au-delà de cette limite (techniquement, un taux d'incorporation de 20% dans les réseaux de distribution est admissible) ;
- la combinaison de cet hydrogène avec du CO<sub>2</sub> pour former du méthane de synthèse par la réaction de méthanation, qui peut être thermocatalytique ou de nature biologique. Le méthane ainsi produit est très proche du contenu actuel des réseaux de gaz naturel. Toutefois, le rendement de conversion est plus faible, de l'ordre de 50%, et le coût de production de ce méthane de synthèse est plus élevé que celui de l'hydrogène. Même si cette voie présente une moindre performance, elle donne accès aux très grandes capacités de stockage d'énergie<sup>12</sup> que représentent les réseaux de gaz naturel par l'injection de méthane de synthèse.

Le stockage d'énergie renouvelable par hydrogène et/ou méthane de synthèse présente l'intérêt de ne générer aucune évolution majeure du réseau de gaz (le gaz étant injecté dans les canalisations existantes), ni augmentation des émissions de CO<sub>2</sub>. Au-delà de la question du stockage, la conversion d'électricité en hydrogène et/ou méthane de synthèse permettrait de valoriser des excédents de production d'électricité renouvelable vers les usages du gaz (chauffage, cuisson, gaz naturel véhicule, production d'électricité) et d'éviter des importations de gaz naturel. Une étude prospective menée en 2014 pour le compte de l'ADEME, de GrDF et de GRTgaz, évalue à 3 TWh<sub>e</sub> les

<sup>11</sup> Rendement de l'ordre de 70%

<sup>12</sup> Les capacités de stockage de gaz en France sont de 137 TWh, sources GRTgaz et GrDF

excédents électriques de longues durées ainsi valorisables à l'horizon 2030<sup>13</sup>. Le coût de production de ce gaz est estimé entre 70 €/MWh<sub>PCS</sub> (pour l'hydrogène) et 150 €/MWh<sub>PCS</sub> (pour le méthane de synthèse), soit 2 à 4 fois les prévisions de prix du gaz naturel de l'Agence Internationale de l'Énergie à cette échéance. Ce surcoût est cependant à relativiser compte tenu des services que cette solution de « *power-to-gas* » peut rendre au réseau électrique<sup>14</sup>, ou sa valeur potentielle sur les marchés de la mobilité.

Même si les services rendus par l'hydrogène et/ou méthane de synthèse au réseau sont attendus à terme (2030), compte tenu de l'évolution progressive du mix électrique, il est nécessaire d'engager dès aujourd'hui des développements industriels pour accompagner la construction progressive de la filière et des infrastructures,

A noter que pour les usages diffus, l'hydrogène nécessite un transport routier qui peut impacter son bilan environnemental. Si la distance de transport routier dépasse 250 km, l'intérêt environnemental de l'hydrogène est réduit. C'est donc à une échelle locale que l'hydrogène peut apporter de la flexibilité aux systèmes énergétiques et que les bénéfices environnementaux liés à son emploi seront les plus grands.

## Les défis de la filière hydrogène

Le déploiement à plus grande échelle de l'hydrogène énergie suppose la poursuite des développements pour optimiser et fiabiliser les briques technologiques nécessaires. Pour les piles à combustible, les électrolyseurs PEM et alcalin, il s'agit notamment de garantir leurs performances dans le temps, d'allonger leur durée de vie, d'augmenter leur taille ou la pression de service, etc. La problématique de la rareté, du coût et de la recyclabilité des matériaux constituant ces équipements est également un enjeu. Dans le domaine de la compression et du stockage de l'hydrogène, des gains sur la consommation énergétique des auxiliaires (électricité, chaleur) sont possibles.

<sup>13</sup> [Etude portant sur l'hydrogène et la méthanation comme procédé de valorisation de l'électricité excédentaire](#), ADEME, GRDF, GRTgaz, sept 2014

<sup>14</sup> [Mix électrique 100% renouvelable ? Analyses et optimisations](#), ADEME, oct 2015

Comme toute nouvelle technologie, celles relevant de l'hydrogène énergie présentent encore des coûts élevés. Le processus d'industrialisation, déjà engagé, doit se poursuivre. Il concerne des composants spécifiques (membranes, plaques bipolaires, électrodes) mais également les auxiliaires nécessaires aux systèmes (convertisseurs, humidificateur, compresseurs, etc.). Des innovations sont par ailleurs nécessaires, tout particulièrement dans le domaine de la mobilité et des systèmes embarqués (intégration des systèmes dans des chaînes de traction ou chaînes fonctionnelles).

Enfin, comme tout gaz, l'emploi, le transport et la manipulation de l'hydrogène comportent des risques. Les risques associés à la production et à l'utilisation de l'hydrogène dans le milieu industriel sont encadrés réglementairement et des codes de bonnes pratiques existent. Par ailleurs, des recommandations permettent de maîtriser ces risques dans les nouvelles applications (production décentralisée<sup>15</sup>, véhicules et stations-service<sup>16</sup>). De plus, les projets doivent être menés en concertation avec l'ensemble des acteurs (futurs usagers, riverains, services d'intervention et de secours, services de l'Etat).

## Actions de l'ADEME

L'ADEME accompagne des projets d'expérimentation et de développement des applications de l'hydrogène énergie au travers de ses actions de soutien à la recherche, au développement et à l'innovation. Depuis 2012, l'ADEME a ainsi piloté l'appel à projets TITEC (Transfert industriel et Tests en Conditions réelles) sur la thématique. Les 4 vagues de cet appel à projets ont permis de soutenir 21 projets collaboratifs associant 57 bénéficiaires différents (laboratoires, industriels, PME, collectivités, associations).

Pour les véhicules hydrogène, l'ADEME s'attache à valider l'adéquation entre véhicules et usages. Le projet TITEC [HyWay](#), coordonné par le pôle Tenerrdis, vise en particulier à tester auprès d'une trentaine d'utilisateurs

professionnels, des véhicules Kangoo ZE équipés de prolongateurs d'autonomie à hydrogène. Ces véhicules sont alimentés par deux stations localisées à Lyon et Grenoble, qui seront à terme connectées à une production locale d'hydrogène par électrolyse.

En matière de stockage, l'ADEME soutient et accompagne un premier démonstrateur de « *power-to-gas* » en France sur le territoire de la Communauté urbaine de Dunkerque, dans une région au fort potentiel éolien. Ce projet, dénommé [GRHYD](#), soutenu dans le cadre du programme d'Investissements d'Avenir, est coordonné par le CRIGEN (centre de recherche d'Engie) et associe une dizaine de partenaires. Il expérimente l'injection d'hydrogène dans le réseau local de distribution de gaz naturel, pour l'alimentation d'un éco-quartier de 200 logements. En parallèle, le mélange constitué d'hydrogène et de gaz naturel, appelé « *Hythane®* », sera utilisé comme combustible par la flotte de bus GNV de l'agglomération. L'ADEME a récemment sélectionné le projet HYCABIOME, coordonné par Solagro et qui vise la mise au point d'un pilote de méthanation biologique. Cette voie pourrait s'avérer intéressante à terme pour valoriser le CO<sub>2</sub> contenu dans le biogaz - de l'ordre de 40% - obtenu par méthanisation et ainsi optimiser les installations.

Au-delà du soutien à la recherche, au développement et à l'innovation, l'ADEME :

- réalise des études prospectives pour préfigurer les conditions économiques de déploiement de ces solutions (étude IEA/HIA Task 38 sur le Power-to-gas, étude Smarthyles sur les micro-réseaux électriques) ;
- s'engage auprès des acteurs de la filière regroupés au sein de l'AFHYPAC à mieux faire connaître les technologies de l'hydrogène et à préparer son déploiement.
- participe plus spécifiquement aux travaux réglementaires et à la mise en place d'un dispositif de garantie d'origine de l'hydrogène renouvelable.

<sup>15</sup> ADEME, Guide d'information sur les risques et les mesures de sécurité liés à la production décentralisée d'hydrogène, 2015

<sup>16</sup> ADEME, Guide d'information sur la sécurité des véhicules à hydrogène et des stations-service de distribution d'hydrogène, 2015

## Avis de l'ADEME

L'hydrogène est un vecteur qui présente un intérêt environnemental lorsqu'il est produit et consommé localement à partir de ressources renouvelables. Il peut participer ainsi à l'optimisation des ressources énergétiques d'un territoire.

En effet, le vecteur énergétique qu'est l'hydrogène issu de ressources renouvelables représente un facteur de souplesse et d'ajustement dans un système énergétique décarboné :

- En appui au développement de l'électromobilité du fait des services rendus supplémentaires (plus grande puissance du véhicule, prolongation d'autonomie, rapidité de recharge),
- En appui au développement des énergies renouvelables variables en tant que moyen de stockage de long terme (>12h) et intersaisonnier.
- En valorisant des excédents d'électricité renouvelable, au travers d'un vecteur gaz, dans des usages transport et habitat.

### POUR EN SAVOIR PLUS

#### Publications ADEME

- Feuille de route ADEME « [Hydrogène énergie et piles à combustible](#) », avril 2011
- [Guide d'information sur la sécurité des véhicules à hydrogène et des stations-service de distribution d'hydrogène](#), juin 2015
- [Guide d'information sur les risques et les mesures de sécurité liés à la production décentralisée d'hydrogène](#), juin 2015

#### Sites Internet

- site de l'AFHYPAC : <http://www.afhypac.org/>