

FICHE TECHNIQUE

L'HYDROGENE DANS LA TRANSITION ENERGETIQUE

Mars 2018⁽¹⁾

Ce qu'il faut retenir

Les développements technologiques et les expérimentations menées ces dernières années dans le domaine de l'hydrogène permettent d'affirmer que ce vecteur apportera quatre contributions majeures à la transition énergétique et écologique :

- Dans le cadre d'un mix électrique futur associant fortement les sources renouvelables (solaire, éolien, hydraulique), **l'hydrogène apporte des solutions de flexibilité et d'optimisation aux réseaux énergétiques**. Tout d'abord, en tant que gaz, **l'hydrogène est stockable** et contribue à pallier la variabilité temporelle des renouvelables et des usages énergétiques. De plus, via le procédé de « power-to-gas », **il permet de décarboner progressivement le contenu des réseaux de gaz** et des usages associés.
- **Le stockage permis par les technologies hydrogène offre de nouvelles perspectives pour l'autoconsommation à l'échelle d'un bâtiment, d'un îlot ou d'un village**. Ce stockage repose sur la complémentarité entre un stockage court terme (batteries), et une chaîne hydrogène qui assure un stockage sur plusieurs jours, semaines ou mois. La pertinence économique de cette solution commence à être réelle pour certains sites non interconnectés au réseau électrique continental, dans les collectivités d'outre-mer par exemple.
- **L'hydrogène embarqué apporte des solutions nouvelles pour l'électromobilité**, notamment pour des véhicules lourds, ou pour garantir autonomie et disponibilité pour des véhicules utilitaires légers. Cela concerne ainsi en priorité **les véhicules à usage professionnel**, qu'ils soient terrestres, maritimes, fluviaux, ferroviaires. Les technologies associées à l'hydrogène mobilité sont encore chères et les expérimentations et pré-déploiements à venir nécessitent, comme toute technologie émergente, un soutien pour amorcer la demande de véhicules et accélérer l'industrialisation. A terme, des modèles économiques viables semblent atteignables pour une mobilité électrique hydrogène professionnelle.
- L'industrie emploie actuellement plus de 900 000 tonnes d'hydrogène par an, produit à partir de combustibles fossiles, ce qui représente 7,5% des émissions de gaz à effet de serre de l'industrie française. **L'enjeu est d'améliorer les procédés et de substituer, lorsque cela est possible, des ressources renouvelables aux ressources d'hydrogène fossiles.**

TABLE DES MATIERES

Ce qu'il faut retenir	1
1. Introduction : Contexte & Enjeux.....	3
1.1. Maîtrise des besoins et efficacité énergétique avant tout	3
1.2. Quatre contributions majeures à la transition énergétique et écologique	3
2. Apporter de la flexibilité aux réseaux énergétiques	4
2.1. Les EnR électriques se déploient	4
2.2. Un équilibrage intersaisonnier des réseaux électriques.....	4
2.3. Décarboner les usages du gaz par le power-to-gas.....	4
2.4. De nouvelles voies de valorisation des EnR dans les usages	6
3. Favoriser localement l'autoconsommation des énergies renouvelables	6
3.1. Bâtiments, îlots et villages isolés non interconnectés	6
3.2. Ecoquartiers et écoîlots	7
4. Apporter des solutions de mobilité propres et flexibles.....	8
4.1. Des véhicules électriques adaptés à des usages professionnels	8
4.2. Modèle économique : les réglementations locales, facteur clé	8
4.3. Un déploiement des stations sur le territoire via les clusters	10
4.4. Des bénéfices environnementaux sous conditions	10
5. Réduire les impacts liés à l'emploi industriel d'hydrogène fossile	12
6. Rendement et sécurité : les points de débat sur l'hydrogène	13
6.1. Rendement énergétique	13
6.2. Les risques accidentels	13

1. Introduction : Contexte & Enjeux

La présente fiche technique porte sur les contributions attendues du vecteur hydrogène à la transition écologique et énergétique, rendue nécessaire pour lutter contre les changements climatiques et réduire les impacts des activités humaines sur la santé et les écosystèmes.

1.1. Maîtrise des besoins et efficacité énergétique avant tout

En préambule, il est utile de préciser que la transition énergétique repose avant tout sur des actions en faveur de la maîtrise des consommations d'énergie et de gains en efficacité énergétique dans tous les secteurs. Le recours au vecteur hydrogène apportera des solutions, de la flexibilité, des services pour la mise en œuvre de cette transition, mais il ne peut conduire à limiter les efforts à engager, notamment en terme de maîtrise des besoins et d'efficacité énergétique.

La récente actualisation du scénario énergie-climat ADEME 2035 – 2050¹ rappelle ainsi que la tenue de nos objectifs en terme de baisse de consommation d'énergie finale (-50% à l'horizon 2050) et de nos émissions de gaz à effet de serre (-75% au même horizon) nécessite :

- Dans le domaine des bâtiments et de l'organisation urbaine : la généralisation des bâtiments BBC/BEPOS et l'objectif d'un parc BBC rénovation à l'horizon 2050, le maintien du confort avec une évolution contenue des usages spécifiques de l'électricité, le recours à des équipements de plus en plus performants, la rationalisation de l'usage du foncier dans le tertiaire, etc.
- Dans le domaine des transports et de la mobilité : la diminution du parc de véhicules individuels et le report vers des modes et comportement nouveaux (covoiturage, autopartage, recours aux services de mobilité), l'évolution des motorisations vers l'électrique et les gaz, une croissance contenue du transport de marchandises grâce à des restructurations logistiques, le report de la route vers le rail, le fluvial et le maritime, etc.
- Dans le domaine de l'industrie et des procédés industriels : l'amélioration des technologies de production plus économes en énergie, une valorisation généralisée des énergies dites « fatales » ou non utilisées comme la chaleur, le recours à l'écoconception, l'organisation optimale de l'énergie dans les entreprises grâce notamment à un meilleur suivi, etc.

Dans ces différents domaines, le recours au vecteur hydrogène sera d'autant plus efficace qu'il s'accompagnera de mesures de maîtrise des besoins et d'efficacité énergétique. Ainsi, par exemple, l'usage d'un véhicule équipé d'une pile à hydrogène aura d'autant moins d'impacts environnementaux que le véhicule aura été conçu pour être le plus léger possible, et qu'il comprendra à bord plusieurs passagers ou qu'il sera partagé entre plusieurs utilisateurs.

1.2. Quatre contributions majeures à la transition énergétique et écologique

L'accompagnement sur les dernières années de projets d'innovation et de démonstrateurs dans les territoires, la réalisation récente d'études prospectives et l'évolution du contexte énergétique dans certains domaines conduisent l'ADEME à mettre à jour son avis sur la place du vecteur hydrogène dans la transition énergétique et écologique². Les enjeux pour les années à venir s'articulent autour de quatre grands axes :

- Apporter de la flexibilité aux réseaux énergétiques
- Favoriser localement l'autoconsommation des énergies renouvelables
- Apporter des solutions de mobilité propres et flexibles
- Réduire les impacts liés à l'emploi industriel d'hydrogène fossile

¹ [Actualisation du scénario énergie-climat ADEME 2035-2050, octobre 2017](#)

² Ces éléments sont actuellement pris en compte dans le nouvel exercice de prospective pour des scénarios énergie-climat 2035-2050, pour 2019 et 2020.

2. Apporter de la flexibilité aux réseaux énergétiques

2.1. Les EnR électriques se déploient

Les bénéfices liés au développement des énergies renouvelables sont multiples³ : baisse des émissions de GES, sécurité d'approvisionnement, stabilité des coûts, indépendance énergétique, relocalisation de la valeur et des emplois. L'ADEME propose une trajectoire ambitieuse qui permettra de porter la part de ces énergies renouvelables de 15% aujourd'hui à 40% en 2035 et 60-70% en 2050, tous secteurs d'usage confondus. Dans le domaine des énergies renouvelables électriques, certaines filières sont d'ores et déjà compétitives avec les installations conventionnelles. Le coût complet constaté en 2016 s'étend ainsi de 57 à 91 €/MWh pour l'éolien ; celui du photovoltaïque en centrales au sol de 68 à 87 €/MWh. La valorisation des potentiels les plus importants d'énergies renouvelables (solaire, éolien) va néanmoins nécessiter, du point de vue des réseaux électriques, des renforcements ainsi que des solutions de stockage et de flexibilité.

2.2. Un équilibrage intersaisonnier des réseaux électriques

A ce titre, l'hydrogène jouera un rôle de **passerelle entre les réseaux électriques et les réseaux de gaz, qui permettra de stocker de grandes quantités d'énergie renouvelable sur de longues durées**. Le gaz stocké est mobilisé ultérieurement pour reproduire de l'électricité selon la demande : c'est ce qu'on appelle, pour les réseaux électriques, le « stockage intersaisonnier » ou « power-to-gas-to-power » entre périodes excédentaires (plutôt estivales) et déficitaires (plutôt hivernales). Les infrastructures électriques disposeront de plus en plus de capacité de stockage d'électricité, dits de court ou moyen terme (par batteries, air comprimé ou stations hydrauliques⁴) ayant des cycles de charge / décharge de quelques heures ou quelques jours⁵. L'électricité totale stockable par ces moyens sera de l'ordre du TWh/an. A des taux de pénétration EnR supérieur à 80%, le stockage intersaisonnier, recourant à l'hydrogène, sera complémentaire et permettra de stocker dans les réseaux de gaz plusieurs dizaines de TWh/an. Deux voies de stockage sont plus précisément envisageables :

- L'injection directe d'hydrogène dans les réseaux de gaz : la technologie d'électrolyse produit, à partir d'électricité et d'eau, de l'hydrogène qui peut être injecté dans les canalisations de gaz, à hauteur minimum de 6% en volume, et jusqu'à 20% dans certaines conditions.
- La combinaison de cet hydrogène avec du CO₂ pour former du méthane de synthèse, par la réaction de méthanisation. Le produit formé étant proche du contenu du gaz naturel, il est adapté à une injection en grandes quantités dans les infrastructures gazières (stockage souterrain⁶, réseaux de transport et de distribution).

Le stockage intersaisonnier offre ainsi aux réseaux électriques un service d'équilibrage en stockant sous forme de gaz des surplus d'électricité renouvelable disponibles certaines semaines ou mois pour être réutilisée sur d'autres périodes déficitaires. La production d'électricité à partir du gaz stocké peut se faire par différents moyens (turbines à gaz centralisées, cogénération répartie à base de pile dans l'habitat, etc.).

2.3. Décarboner les usages du gaz par le power-to-gas

Au-delà du stockage intersaisonnier, ou du power-to-gas-to-power, l'injection simple d'hydrogène et de méthane de synthèse dans les infrastructures gazières donnent l'occasion de substituer leur contenu, actuellement fortement carboné. Ainsi les usages finaux traditionnels du gaz naturel dans les bâtiments (chauffage, eau chaude sanitaire, cuisson), l'industrie ou les transports (GNV) pourraient progressivement être couverts par un mélange comprenant de l'hydrogène et/ou du méthane de synthèse. L'étude récente menée pour l'ADEME, GrDF et GRTGZ portant sur un scénario gaz 100% renouvelable en 2050⁷ détaille la faisabilité d'une conversion complète. Compte tenu des coûts estimés

³ *Avis de l'ADEME - Les énergies renouvelables et de récupération, décembre 2017*

⁴ STEP : stations de transfert d'énergie par pompage

⁵ L'étude ADEME *Un mix électrique 100% renouvelable ?*, octobre 2015, précise les capacités de stockage court, de type court-terme, STEP et intersaisonnier, qui seraient nécessaires à l'équilibrage du système selon les hypothèses d'un tel scénario (page 77 et suivantes)

⁶ Ce stockage permet déjà de stocker plus de 140 TWh de gaz.

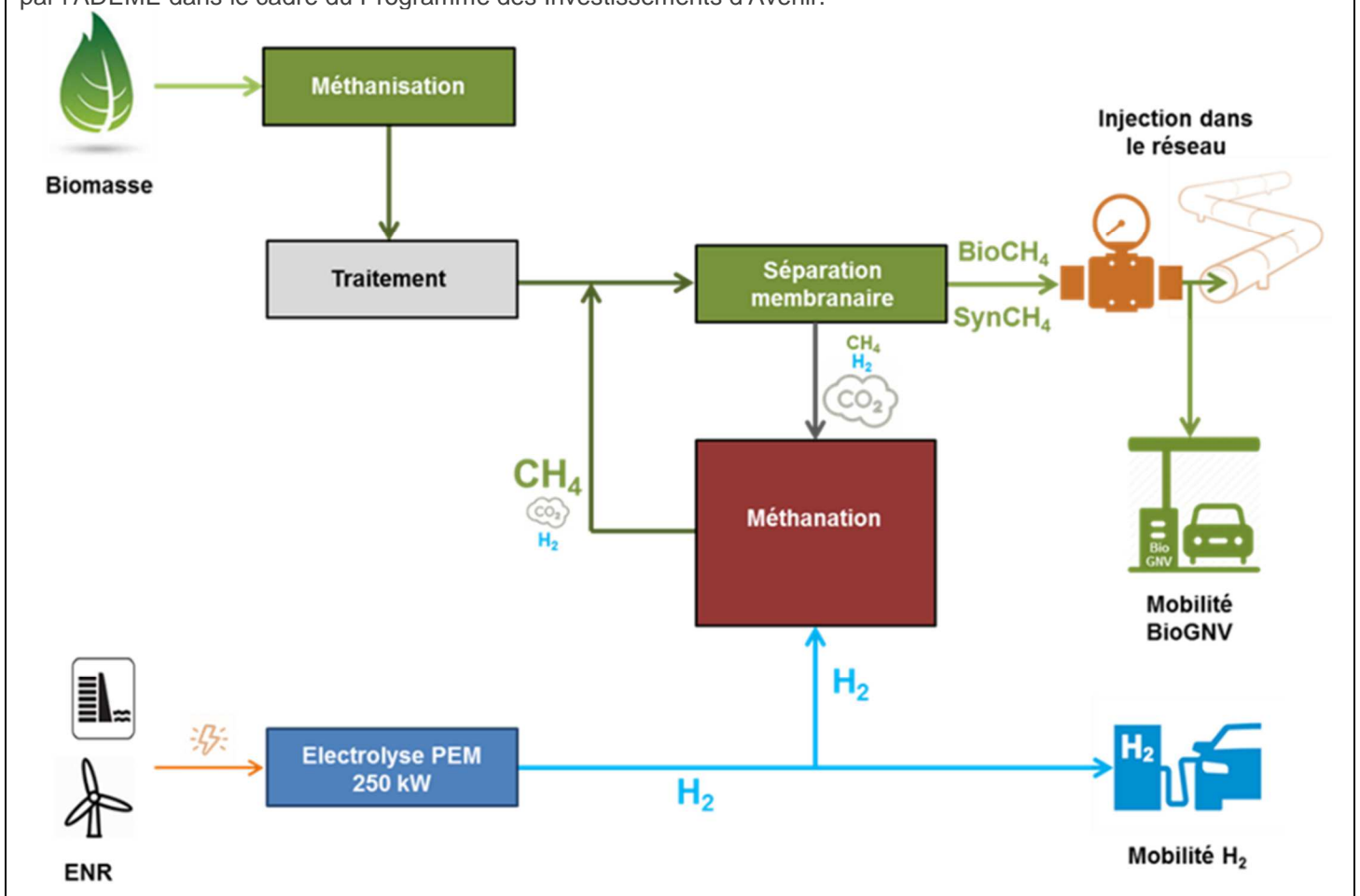
⁷ *Un mix de gaz 100% renouvelable en 2050 ?*, janvier 2018

relativement élevés pour le méthane obtenu par power-to-gas, typiquement entre 105 et 185 €/MWh_{PCS}, cette solution ne peut néanmoins être envisagée que comme une solution partielle.

Les démonstrations GRHYD⁸ et JUPITER 1000⁹, actuellement en cours à Dunkerque et à Fos-sur-Mer contribuent à lever les verrous techniques. Pour les années à venir, une synergie de développement avec la méthanisation semble intéressante : les installations de méthanisation produisent un biogaz contenant jusqu'à 40% de CO₂ d'origine biologique, qu'il est nécessaire de purifier avant l'injection du biométhane qui représente 60% du biogaz. Pour certaines de ces installations, le couplage à un électrolyseur permettra de valoriser ce CO₂ biologique pour une production de méthane de synthèse injectable dans le réseau de gaz. La ressource biomasse est ainsi mieux valorisée, donnant lieu à une injection couplée de biométhane (60%) et de méthane de synthèse (jusqu'à 40%). Le projet METHYCENTRE propose une démonstration de ce couplage et pourra donner lieu à des réplifications.

Focus : le projet Méthycentre

Storengy, filiale d'Engie, expérimentera un démonstrateur de Power-to-gas à Céré-la-Ronde en région Centre Val de Loire. Il s'agit de produire un gaz de synthèse, produit à partir de deux sources : d'une part du CO₂ issu de la génération de biogaz ; d'autre part d'hydrogène renouvelable produit par électrolyse de 250 kW de surplus de production d'électricité renouvelable. Le projet permettra également d'améliorer les technologies portées par les partenaires du projet : électrolyseur (AREVA H2GEN), méthaneur (ATMOSTAT), membrane de purification (PRODEVAL). Ce projet est soutenu par l'ADEME dans le cadre du Programme des Investissements d'Avenir.



⁸ Projet GRHYD

⁹ Projet JUPITER 1000

2.4. De nouvelles voies de valorisation des EnR dans les usages

Le système électrique peut aussi tirer bénéfice d'une valorisation directe du vecteur hydrogène pour atteindre plus largement des usages finaux, et ainsi optimiser le coût du système complet. De récentes simulations technico-économiques réalisées par Artelys pour l'ADEME indiquent qu'à l'horizon 2035, le système électrique, comprenant 64% de renouvelables, peut fournir 30 TWh/an d'hydrogène pour un coût inférieur à 5 €/kg, qui est compétitif pour des usages dans la mobilité et l'industrie. Dans ces simulations, le coût moyen de l'électricité consommée par les électrolyseurs s'établit à 42 €/MWh.

3. Favoriser localement l'autoconsommation des énergies renouvelables

Si le vecteur hydrogène apporte des solutions pour la gestion à grande échelle des réseaux énergétiques, son recours permet aussi de mieux valoriser les énergies renouvelables produites localement, au plus près des usages. Cependant, techniquement et économiquement, cela ne se justifie pas partout. **Les bâtiments, ilots, villages isolés sont des cas où la recherche d'autonomie énergétique peut conduire à stocker partiellement l'énergie sous forme d'hydrogène.**

3.1. Bâtiments, ilots et villages isolés non interconnectés

En France métropolitaine, le réseau électrique continental est très développé et connecte la majorité des points de consommations du territoire. Cela n'est pas le cas de la Corse, des certaines îles et des territoires d'Outre-Mer, qui ont leur production et leur réseaux ou micro-réseaux propres. Ces territoires sont caractérisés par une production électrique dominée par les centrales thermiques au fioul au coût relativement élevé – 225 €/MWhé en moyenne en 2013¹⁰ – et des considérations d'équilibrage offre / demande plus sensibles qu'en métropole. Dans ces zones, les actions de maîtrise de la demande d'électricité, le développement des sources renouvelables et la question du stockage sont prédominantes. Ces conditions, qui sont communes à d'autres régions du monde, en Amérique du Sud, en Afrique ou en Asie du Sud Est, rendent rentable dans certains cas un stockage d'électricité hybride, associant batterie et chaîne hydrogène. La batterie assure un stockage dit de court-terme : elle se charge pendant la journée lorsque les panneaux solaires produisent en excès et se décharge le soir et la nuit pour couvrir les besoins sur ces plages horaires. La chaîne hydrogène assure un stockage complémentaire, comme une réserve d'énergie qui permet au bâtiment, à l'îlot, au village, à la communauté d'être autonome en énergie sur quelques jours ou semaines lorsque la production solaire et le stockage batterie ne sont pas suffisants.

Focus : le projet de La Nouvelle à la Réunion

Le village de La Nouvelle, au cœur du Cirque de Mafate à La Réunion, expérimente depuis l'été 2017 un système de stockage hybride batterie / chaîne hydrogène, dans le cadre d'un projet porté par EDF SEI et le Sidélec (Syndicat d'électrification de La Réunion) et soutenu par la Direction Régionale ADEME. L'installation comprend une production PV (7,8 kWc), des batteries lithium (15,6 kWh), un électrolyseur et une pile (3 kW) et un stockage d'hydrogène (3 kg). L'ensemble permet à trois bâtiments (le dispensaire, l'école et le bâtiment de l'ONF) d'être 100% autonome en énergie. Si l'expérimentation est concluante, elle sera étendue à l'ensemble du village qui pourra alors se passer du fioul qui alimente ses groupes électrogènes.



¹⁰ Inspection Générale des Finances, CGEDD et CGE, Revue de dépenses, Péréquation tarifaire de l'électricité avec les zones non interconnectées, octobre 2017

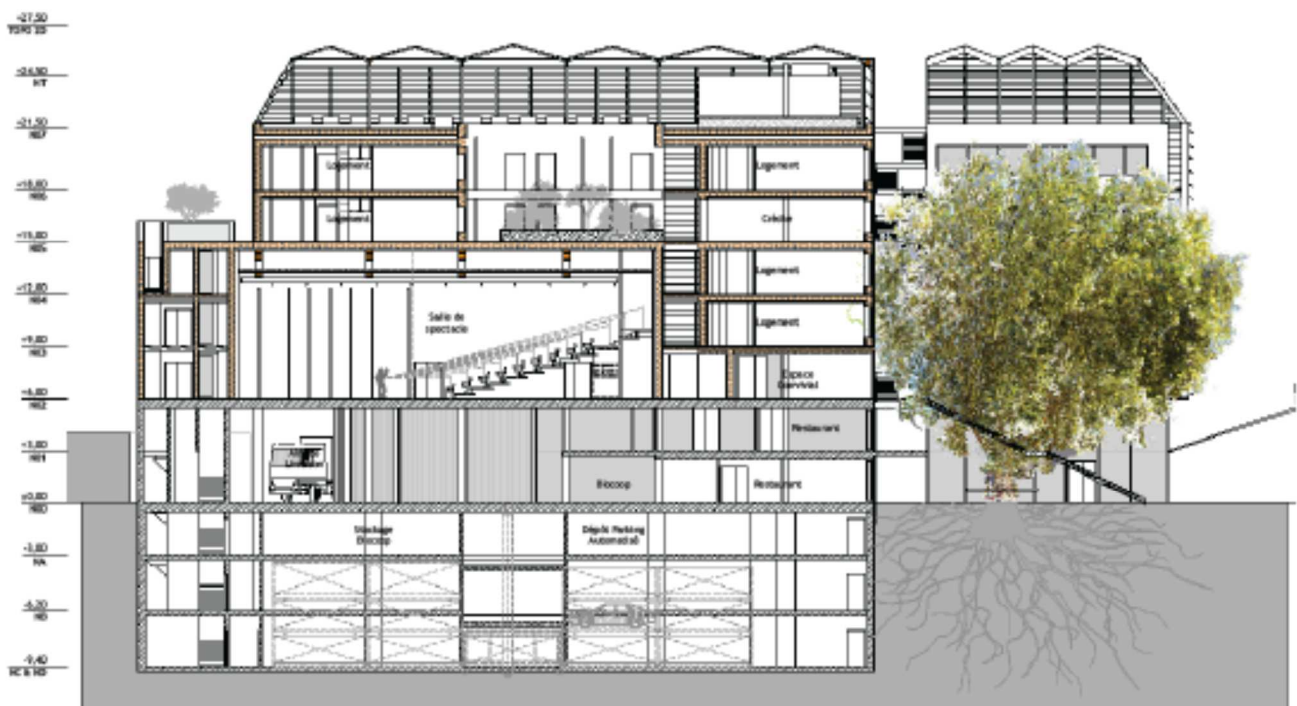
3.2. Ecoquartiers et écoîlots

La loi de transition énergétique pour la croissance verte fixe des objectifs ambitieux dans le domaine des bâtiments, avec la rénovation de l'ensemble du parc bâti selon les normes « bâtiments basse consommation » à l'horizon 2050 et l'introduction de réglementations plus exigeantes dans le neuf, selon le label « énergie-carbone » (E+C-). Connectés aux réseaux électriques et gaziers locaux, l'hydrogène et les piles à combustible pourront apporter des services à l'échelle du quartier ou de l'îlot de bâtiments facilitant l'autoconsommation des énergies renouvelables :

- Le principe du stockage hybride batterie / chaîne hydrogène peut s'appliquer à des bâtiments et quartiers qui ont une production d'électricité photovoltaïque. L'autonomie totale sur l'année n'est pas nécessairement pertinente s'ils sont connectés à un réseau électrique local. En revanche, le stockage peut permettre l'offre de service, comme le secours électrique pour des usages sensibles, l'effacement ponctuel vis-à-vis du réseau électrique, le développement d'offres nouvelles comme l'hébergement numérique (cf projet EcobioH2), ou la fourniture d'énergie à des véhicules électriques. Ces services sont clés dans le modèle économique d'un tel type de stockage.
- Dans le cas d'une connexion au réseau gazier, un quartier ou un bâtiment peut également produire électricité et chaleur via une pile alimentée au gaz pour couvrir une partie de ses besoins. C'est le principe de microcogénération qui sera d'autant plus intéressant que les réseaux de gaz vont contenir une part croissante de gaz renouvelable. L'électricité produite peut être consommée sur place mais aussi réinjectée sur le réseau électrique local pour être valorisée sur la zone ou le territoire au besoin. Ce peut être le cas par exemple au moment de l'appel de puissance électrique en période de grand froid. Un programme de démonstration ADEME-GrDF d'une cinquantaine de piles dans l'habitat est prévu en 2018 pour confirmer ces potentialités, qui sont par ailleurs étudiées dans d'autres pays européens comme en Allemagne.

Focus : le projet EcobioH2

Au cœur d'Avignon, le magasin Biocoop sera prochainement rénové pour laisser place à un éco-ilôt tertiaire abritant plusieurs activités (commerces, restauration, hébergement, activités culturelles). Ce bâtiment à haute performance environnementale (label Bâtiment Durable Méditerranéen Or), comprendra un data center équipé d'un système de stockage hybride batterie / chaîne hydrogène pour proposer une offre d'hébergement numérique garantie 100% renouvelable pour les acteurs du territoire. Le système intégré comprend également un pilotage intelligent de l'énergie sur l'ensemble du bâtiment et de ses usages.



4. Apporter des solutions de mobilité propres et flexibles

4.1. Des véhicules électriques adaptés à des usages professionnels

L'hydrogène, stocké et embarqué dans un réservoir sous forme comprimé, constitue une réserve d'énergie pour un véhicule à traction ou à propulsion électrique. L'hydrogène y est converti en électricité et en chaleur via une pile, qui alimente le moteur électrique, ainsi que l'habitacle pour le chauffage. La chaîne de traction des véhicules électriques qui mettent en œuvre une pile à hydrogène associe généralement une batterie, avec un degré d'hybridation variable selon les profils souhaités de puissance et d'énergie. **Les technologies batteries et pile à combustible apparaissent aujourd'hui comme complémentaires dans le domaine de l'électromobilité.**

Cette complémentarité est intéressante pour des profils d'usage exigeants, dans le domaine du transport de personnes ou de marchandises, pour lesquels on souhaite des véhicules propres à l'émission avec un niveau de service élevé :

- Autonomie énergétique accrue : les véhicules utilitaires pour la livraison, les camionnettes réfrigérées, les véhicules d'entreprises de service à domicile, sont des véhicules avec des distances de parcours journaliers importantes ou consommant de l'énergie à bord.
- Maintien de la charge utile : dans le domaine des véhicules lourds, la technologie des batteries ne suffit pas à fournir l'énergie et la puissance avec des conditions d'exploitation acceptables. La combinaison de la batterie et d'une pile à hydrogène permet de concevoir des poids lourds, des bateaux, des locomotives et des bus électriques qui peuvent répondre à des caractéristiques d'usage traditionnel avec les carburants liquides.
- Disponibilité du véhicule : le remplissage du réservoir d'hydrogène en quelques minutes permet de s'affranchir de contraintes liées à l'immobilisation du véhicule du fait de la recharge des batteries. Les véhicules fonctionnels, routiers ou non routiers, engins de chantier, de logistique, mais certains taxis, ont des profils d'usage intensifs qui nécessitent une flexibilité à la recharge que permet l'hydrogène.
- Conditions de raccordement au réseau électrique. La multiplicité de véhicules électriques pour une flotte peut conduire à des puissances souscrites au réseau important ou des problématiques d'encombrement sur site. Le découplage entre production d'hydrogène et remplissage des réservoirs apporte de la flexibilité dans ce type de cas. Par ailleurs, dans le domaine du ferroviaire, le recours aux motrices hydrogène est une alternative à l'électrification des voies au coût élevé¹¹.

Le déploiement des véhicules électriques à batterie permettra de répondre à de nombreux usages de mobilité, dont celui des particuliers pour leurs déplacements quotidiens. **Le recours aux véhicules électriques hydrogène apparaît pertinent pour les profils non atteignables par ces véhicules, tout particulièrement dans le domaine des flottes professionnelles, privées et publiques.**

Focus : le projet Cathyopé¹²

L'entreprise Green GT va concevoir un groupe moto-propulseur de forte puissance hybride électrique / hydrogène (610 CV) et développer son intégration sur une plate-forme camion remorque de 44T. Le projet prévoit une expérimentation en conditions réelles d'usage par les Transports Chabas, pour l'alimentation journalière de magasins Carrefour en produits frais entre Montpellier et Nice. Les livraisons actuelles sont réalisées en camion diesel, pour une distance de parcours de 1000 km/j. Ce projet est soutenu par l'ADEME dans le cadre du Programmes des Investissements d'Avenir.

4.2. Modèle économique : les réglementations locales, facteur clé

¹¹ Rapport du Conseil d'orientation des infrastructures, *Mobilité du quotidien : répondre aux urgences et préparer l'avenir, sous la présidence de Philippe Duron, janvier 2018*

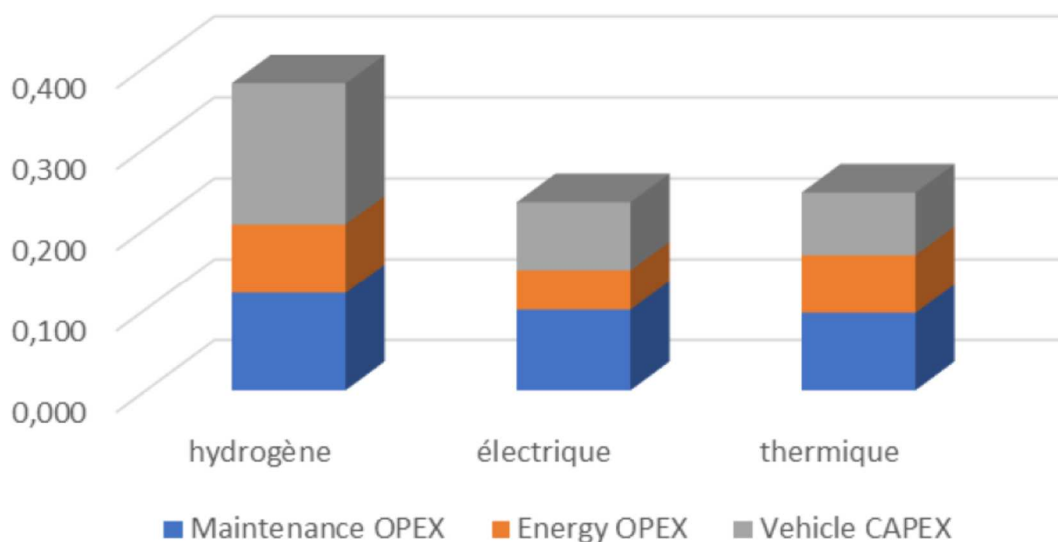
¹² Projet CATHYOPE

L'introduction des véhicules électriques à hydrogène sur les marchés est confrontée à une problématique de coût. La technologie reste chère compte tenu des faibles volumes de production et les offres de véhicules restent limitées à quelques préséries industrielles¹³. La baisse des coûts ne pourra être obtenue que par une industrialisation de la fabrication des piles et l'élargissement de l'offre de véhicules.

Au-delà du coût d'acquisition, les réglementations locales dans les zones urbaines représentent le facteur principal d'émergence des véhicules tels que les véhicules électriques hydrogène. Les restrictions d'accès aux centres urbains tout particulièrement, qu'elles soient horaires ou géographiques, sont de natures à modifier les modèles d'affaire des entreprises de la livraison et des services. Ainsi, pour une telle entreprise, si la livraison est davantage contrainte pour des véhicules présentant des niveaux d'émissions de particules et de polluants dépassant les autorisations locales, et autorisée sur l'ensemble de la journée avec des véhicules « zéro émission », le surcoût à l'achat des véhicules propres pourra être amorti plus facilement.

Focus : l'expérimentation HYWAY¹⁴

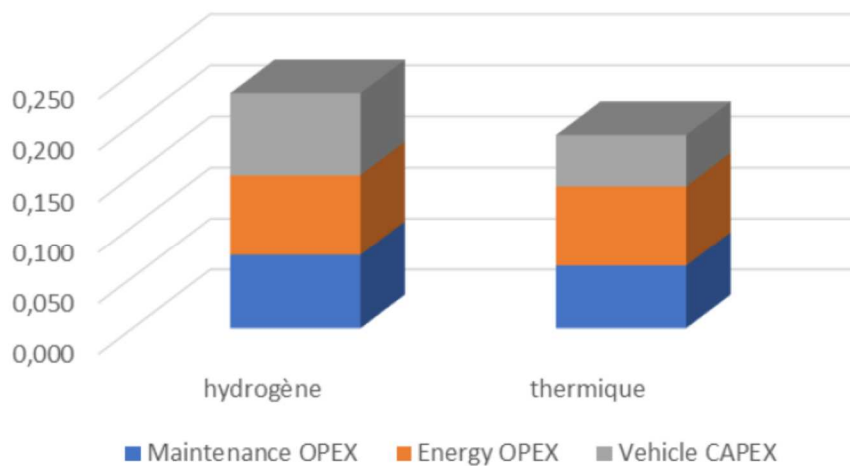
HYWAY représente la première expérimentation de véhicules Kangoo ZE équipés de prolongateur d'autonomie hydrogène pour des usages professionnels à l'échelle de flotte. Celle-ci s'est menée de 2014 à 2017, sur Lyon et Grenoble, avec la mise en place de stations d'alimentation pour l'ensemble de la trentaine de véhicules opérés. Les graphes suivants présentent les coûts totaux de possession du point de vue de l'utilisateur professionnel. Le premier représente les coûts constatés dans le cadre du projet, le second les coûts projetés à 3 ans et un usage intensif représentatif :



Coût global constaté en €/km sur cycle électrique (Symbio)

¹³ Les véhicules légers actuels sont commercialisés autour de 60 k€/u

¹⁴ Expérimentation HYWAY, rapport final complet, février 2018



Coût global projeté à 3 ans en €/km sur cycle intensif de 37 000 km/an (Symbio)

L'industrialisation permet d'envisager une baisse des coûts d'acquisition de ce type de véhicule. Un surcoût résiduel demeure néanmoins face au véhicule diesel, à hauteur de 1300 €/an. Ce calcul économique ne prend cependant pas en compte l'application d'une possible réglementation locale qui peut conduire à limiter l'usage du véhicule diesel et renchérir son coût.

4.3. Un déploiement des stations sur le territoire via les clusters

L'introduction de véhicules équipées d'une nouvelle motorisation est dépendant du déploiement de l'infrastructure de recharge ou d'alimentation de ces véhicules. Cet impératif rend compliqué et coûteux le déploiement des véhicules hydrogène pour les particuliers, qui nécessiterait l'investissement dans un réseau de plusieurs centaines de stations-services sur l'ensemble du territoire avant d'amorcer ce marché.

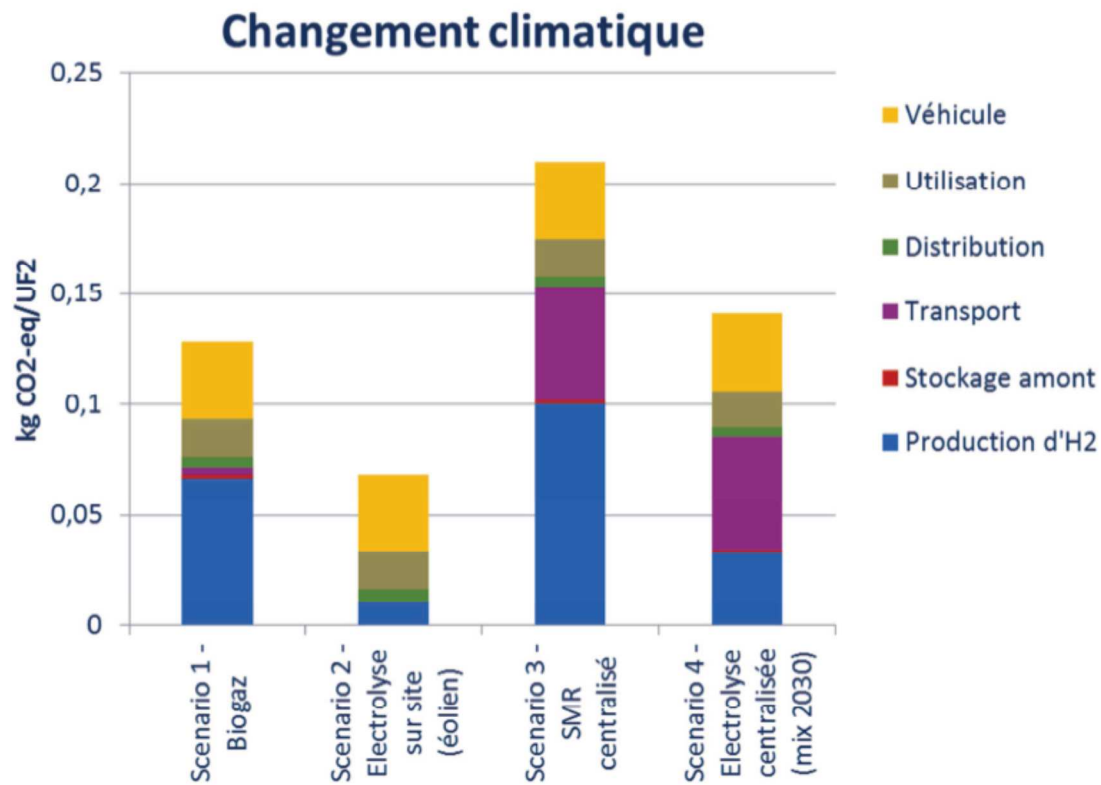
Ce n'est pas le cas du marché des flottes professionnelles, pour lesquelles des stations-services locales peuvent être rentabilisées rapidement dès lors qu'elles alimentent de manière régulière des véhicules qui opèrent dans la zone. Ces stations peuvent être privées, attachées à un dépôt de bus ou dans une zone aéroportuaire par exemple, ou bien semi-publiques c'est-à-dire ouvertes à différents utilisateurs dont l'accès est régulé. **Un tel déploiement se fera donc sur la base de « clusters » locaux, par agrégation d'utilisateurs rendant réalisable l'investissement dans l'infrastructure de distribution.** Typiquement, le modèle économique d'une station pour flotte est accessible pour une consommation journalière supérieure à 80 kg H₂/jour, pour une commercialisation de l'hydrogène à moins de 10 €/kg.

4.4. Des bénéfices environnementaux sous conditions

L'intérêt environnemental de l'hydrogène pour des usages en mobilité est une problématique complexe qui ne peut être analysée au regard d'un seul indicateur ou sur un périmètre réduit à son utilisation finale. En effet, si le véhicule est bien un véhicule électrique « zéro émission à l'échappement » qui répond à la problématique de la qualité de l'air par exemple, il convient d'avoir une vision sur l'ensemble de la chaîne. L'hydrogène n'est qu'un vecteur. Aussi, son impact environnemental dépendra de la source primaire dont il est issu, du procédé de fabrication, de la logistique d'approvisionnement mais aussi des impacts liés à la fabrication du véhicule lui-même et de ses équipements.

L'ADEME a mandaté une analyse de cycle de vie en 2013¹⁵, donnant un premier aperçu des différents impacts liés au parcours d'un km par un véhicule hydrogène. Le graphique suivant illustre la contribution au changement climatique obtenu selon différents scénarios : l'impact global, « du puits à la roue », varie ainsi de 68 à 210 gCO₂/km. Ce seul graphique illustre bien la variabilité des impacts selon des scénarios contrastés, et donc des bénéfices que l'on peut attendre de l'usage de l'hydrogène dans la mobilité.

¹⁵ Evaluation environnementale du vecteur hydrogène appliqué à la mobilité, juillet 2013, étude réalisée par Quantis et Enea Consulting pour l'ADEME (lien à faire avec la médiathèque ADEME)



Les principaux enseignements que l'ADEME retire de ces travaux sont les suivants :

- Le bilan environnemental est largement tributaire de la source primaire utilisée pour fabriquer l'hydrogène : mix électrique du réseau, gaz naturel (technologie SMR¹⁶). **Sur les impacts changement climatique et épuisements des ressources naturelles, la mobilité hydrogène n'a d'intérêt que si l'hydrogène est produit à partir de sources d'énergies renouvelables.**
- La logistique de transport de l'hydrogène, entre le point de fabrication et la station-service, est un facteur de premier ordre dans le bilan. **Il est donc fortement recommandé de limiter les distances d'acheminement (<100 km) et de préférer une production locale d'hydrogène pour des usages locaux.**

Cette première étude est actuellement mise à jour, pour tenir compte notamment de l'évolution de la technologie ; des résultats seront disponibles début 2019. D'autres travaux viennent également compléter l'analyse et sont des points d'attention pour l'ADEME :

- Matériaux précieux : les électrolyseurs et pile de type PEM (Proton Exchange Membrane) nécessitent des matériaux précieux tel le platine ou l'iridium comme catalyseurs de réaction. Une pile à hydrogène comprend par exemple de 1 à 20 g de platine. L'enjeu est bien de poursuivre les développements pour d'une part réduire les quantités nécessaires dans la conception des équipements, et d'autre part permettre le recyclage en fin de vie.
- Bilan systémique : le bilan environnemental de la mobilité hydrogène est à considérer dans un système global qui tienne compte du contexte du véhicule. Ainsi, par exemple, l'évolution de l'usage : à l'échelle d'une flotte, la disponibilité des véhicules peut conduire à un usage optimisé et donc conduire à réduire le nombre de véhicules nécessaires. Les gains en terme d'espace et d'énergie grise sont à quantifier. Par ailleurs, les impacts et bénéfices potentiels sur le réseau électrique sont à évaluer : le fait de découpler la phase de production d'hydrogène par électrolyse et la recharge du véhicule peut se traduire par une flexibilité intéressante du point de vue du réseau et de la gestion des pics de puissance.

¹⁶ SMR : Steam Methane Reforming, ou vaporeformage de méthane

5. Réduire les impacts liés à l'emploi industriel d'hydrogène fossile

Aujourd'hui, en France, plus 900 000 tonnes d'hydrogène sont annuellement produites et consommées dans l'industrie¹⁷. L'hydrogène est utilisé non comme vecteur énergétique mais comme intrant chimique ou matière. La désulfuration des carburants pétroliers et la synthèse d'ammoniac pour les engrais sont les principaux débouchés. L'hydrogène est aussi employé en verrerie, en sidérurgie, dans l'industrie agro-alimentaire, dans l'électronique.

L'hydrogène industriel est aujourd'hui très largement produit à partir de ressources fossiles, gaz naturel et produits pétroliers, via les procédés de vaporeformage et d'oxydation partielle¹⁸. Son emploi conduirait ainsi à l'émission de 10 M tonnes équivalent CO₂, soit 7,5% des émissions de gaz à effet de serre de l'ensemble du secteur industriel national^{19,20}. A ce titre, pour atteindre les objectifs climat établis par la loi de transition énergétique, il est nécessaire de réduire ces émissions. L'amélioration de l'efficacité de ces procédés est un premier levier. Le recours progressif aux procédés d'électrolyse et de transformation de la biomasse (vaporeformage de biogaz, pyrogazéification de biomasse solide) est également à encourager.

Les consommateurs industriels diffus, i.e. consommant typiquement moins de 10 000 tH₂/an, éloignés des grands centres de production d'hydrogène, sont des cibles à privilégier :

- Pour des raisons économiques : si l'hydrogène industriel est produit à un coût faible dans les sites industriels (de 1,5 à 2 €/kg), le conditionnement et l'acheminement en détail aux sites consommateurs conduit à des prix élevés, entre 10 et 20 €/kg. L'hydrogène produit par électrolyse ou à partir de ressources biomasse peut être compétitif sur ce segment.
- Pour des raisons environnementales : comme exposé précédemment, le transport d'hydrogène par camion a un impact environnemental de premier ordre. Il est donc préférable de produire l'hydrogène au plus près des lieux de consommation pour réduire au maximum cette distance d'acheminement²¹.

Focus : projet VABHYOGAZ3

L'entreprise Albhyon (Groupe HERA) a mis au point un procédé innovant de vaporeformage de biogaz, qui permet de produire de l'hydrogène de manière décentralisée (100 à 800 kgH₂/j). Après une phase de démonstration sur le site de Trifyl dans le Tarn-et-Garonne, l'entreprise développe l'industrialisation du procédé, soutenue par l'ADEME dans le cadre du Programme des Investissements d'Avenir.



¹⁷ Les statistiques les plus récentes ont été produites dans le cadre du projet HYFRANCE3, *Développement des marchés de l'hydrogène, janvier 2011*, coordonné par le CEA I-Tésé, en partenariat avec EDF, IFP, Alphéa, GDF SUEZ, CNRS, Air Liquide, Total, l'ADEME et l'AFH2

¹⁸ *Production d'hydrogène à partir de combustibles fossiles, septembre 2014*, AFHYPAC

¹⁹ Facteur d'émission de la production d'hydrogène par procédés industriels : 91 geCO/MJ, soit 10,9kgeCO₂/kgH₂, projet Certifhy, octobre 2015, Deliverable n°D2.4

²⁰ L'industrie manufacturière et l'industrie de l'énergie représentent en 2014 29% de l'ensemble des émissions nationales s'élevant à 459 MteCO₂, source CITEP, inventaire CCNUCC, décembre 2015

²¹ Le transport par camion d'hydrogène émet environ 1kgeCO₂/kgH₂/100km, source ADEME, Evaluation environnementale du vecteur hydrogène appliqué à la mobilité, juillet 2013

6. Rendement et sécurité : les points de débat sur l'hydrogène

Le rendement énergétique de la chaîne hydrogène et les risques accidentels associés à son utilisation sont des questions qui font régulièrement débat. Ces débats sont légitimes, ils pointent les contraintes attachées à cette technologie, qui doivent être prises en compte dans sa mise en œuvre concrète.

6.1. Rendement énergétique

L'hydrogène n'étant qu'un vecteur énergétique, il suppose une succession de transformations, entre source primaire d'énergie et énergie finale utilisée. Le rendement de l'électrolyse – permettant via un courant électrique de décomposer la molécule d'eau en hydrogène et oxygène – est actuellement de l'ordre de 70%. La compression de ce gaz est également consommatrice d'énergie, et la recombinaison de la molécule d'eau dans la pile, pour fournir de l'électricité à nouveau, se fait avec un rendement de l'ordre de 45%. Le rendement global de la chaîne, de l'électricité primaire à l'électricité utile restituée, se situe ainsi dans une fourchette de 20 à 30% selon les applications, la pression de stockage considérée, les schémas logistiques, etc.

Pour cette raison, et dans le but d'une efficacité globale des systèmes énergétiques, le stockage électrochimique à batterie est à privilégier lorsque cela est possible. Le rendement de ce type de stockage est en effet meilleur, supérieur à 80%. Par exemple, dans le domaine de la mobilité, le véhicule électrique à batterie seule est à préférer pour les profils d'usage qui peuvent être couverts par ce type de véhicule, selon l'autonomie énergétique souhaitée, la disponibilité du véhicule requise, etc. Le recours à l'hydrogène est à considérer lorsque cette solution n'est plus opérante, comme explicité précédemment (véhicules lourds, disponibilité pour une flotte de véhicule).

C'est également pour cette raison que les applications qui se développent dans le domaine de l'hydrogène sont généralement basées sur une hybridation des technologies de stockage, entre batterie et chaîne hydrogène. Ce principe, qui concerne autant les applications embarquées que stationnaires, permet de tirer avantage de chacune des technologies. La chaîne hydrogène est en général requise pour apporter un service supplémentaire ou lever des contraintes qui sont liées soit à l'usage, soit aux infrastructures énergétiques, et qui ne peut être assuré par les batteries. Ainsi, au-delà du rendement énergétique, la question clé de la pertinence du recours à la chaîne hydrogène, est celle du service rendu. Dans certains cas, comme ceux exposés plus haut, la chaîne hydrogène apporte de la flexibilité et des solutions entre sources et usages :

- Pour la gestion des réseaux électriques et gaziers à très fort taux de pénétration des énergies renouvelables, le stockage intersaisonnier de grande quantité d'énergie, au-delà du TWh, n'est possible que par ce biais. Il donne une garantie d'équilibre aux systèmes énergétiques dans un contexte de variabilité des sources et de saisonnalité des usages.
- Dans le domaine de la mobilité, embarquer de l'hydrogène libère certaines contraintes liées à la technologie batterie, en terme d'encombrement et de recharge au réseau : le recours à la chaîne hydrogène permet ainsi à l'électromobilité d'accroître ses performances et de concurrencer sur les mêmes bases d'usage les véhicules thermiques. Il donne aussi au gestionnaire de réseaux électriques des solutions de régulation pour la recharge de ces nouveaux usages.
- Dans le domaine du stationnaire, l'alimentation énergétique de certains territoires comme les zones non interconnectées suppose des moyens de stockage distribués. Associé aux énergies renouvelables disponibles localement, le recours à l'hydrogène peut permettre de s'affranchir d'une logistique coûteuse de distribution de carburants pour des groupes diesel.

Le service rendu et les bénéfices environnementaux sont ainsi les critères principaux qui justifient, sur un plan technique mais également économique, le fait de stocker une partie de l'énergie disponible sous forme hydrogène. Les modèles économiques qui apparaissent aujourd'hui sont construits autour de ce service rendu, en complémentarité avec les autres technologies disponibles.

6.2. Les risques accidentels

Tout comme d'autres gaz combustibles ou sources d'énergie, la manipulation de l'hydrogène comporte des risques, en particulier d'inflammation et d'explosion. Il présente certaines caractéristiques physico-chimiques qui, par plusieurs aspects, facilitent ou complexifient la maîtrise de ces risques par rapport à d'autres gaz et liquides^{22,23} :

- Une propension à fuir plus importante : la molécule d'hydrogène est de petite taille et de faible viscosité, ce qui facilite les fuites ;
- Une probabilité d'inflammation plus élevée, liée à une énergie minimale d'inflammation faible, qui peut être apportée par une flamme ou une étincelle ;
- Une probabilité d'explosion à l'air libre plus faible compte tenu d'une forte diffusivité qui réduit le risque de formation d'un nuage explosif en milieu non confiné ;
- Une combustion plus rapide, favorisant le phénomène de déflagration ;
- Une flamme peu visible et peu radiative.

Ces caractéristiques sont connues et maîtrisées en milieux industriels, qui emploient depuis des années de l'hydrogène en grandes quantités sur certains sites comme les raffineries ou les usines d'ammoniac. Le cadre réglementaire historique actuel, qui encadre ces risques, est adapté à cet emploi traditionnel de l'hydrogène dans l'industrie. Il en découle également un retour d'expérience et un savoir-faire industriel et technique sur la manipulation de ce gaz.

Les nouveaux usages de l'hydrogène comme vecteur énergétique, compte tenu de contextes multiples (bâtiments, véhicules, ports et aéroports, entrepôts, etc.) et de quantités mises en œuvre différentes, changent la nature des risques et leur encadrement. Aussi, le cadre normatif et réglementaire se construit-il depuis quelques années en fonction de l'émergence de ces nouvelles applications, de manière à garantir un niveau de sécurité élevé pour les utilisateurs et les riverains. Ce cadre impose des tests de sécurité, des points de contrôle sur les équipements et les installations, des spécifications techniques à respecter, des barrières de sécurité à mettre en place, des processus de détection d'anomalies, etc²⁴. On peut citer par exemple :

- Le règlement européen CE n°79/2009 et sa directive d'application 406/2010 portent spécifiquement sur les véhicules hydrogène et les différents équipements embarqués ;
- La rubrique n°4715 de la réglementation nationale relative aux installations classées pour la protection de l'environnement encadre le stockage d'hydrogène comprimé selon les quantités concernées ;
- La norme NF M58-003 « Installation des systèmes mettant en œuvre l'hydrogène » détaille des préconisations à suivre pour des installations stationnaires ;
- La directive européenne 2014/94/UE, relative au déploiement d'une infrastructure pour carburants alternatifs, s'appuie sur les normes ISO/TS 20100 relative aux stations-services et ISO 17268 relative aux dispositifs de raccordement pour le ravitaillement des véhicules.

La maîtrise des risques accidentels liés à l'hydrogène comme vecteur nécessite la poursuite de la définition d'un cadre réglementaire adapté, qui repose sur un travail conjoint entre l'administration, les centres techniques compétents, et l'ensemble des acteurs concernés (équipementiers, exploitants, usagers, etc.).

La maîtrise des risques repose également sur la bonne diffusion des savoir-faire, que permet la formation pour apprendre à utiliser ces nouvelles applications énergétiques. Dans ce domaine, les sapeurs-pompiers français anticipent l'arrivée des véhicules hydrogène. Ils ont ainsi développé des connaissances théoriques et pratiques²⁵, sur la base de l'expérience concrètes de différents SDISS (44, 86, 50)²⁶ et de projets européens comme HyResponse, qui permet désormais aux sapeurs-pompiers de se former à l'intervention sur site en cas de sinistre impliquant l'hydrogène²⁷. Leur connaissance et expérience des différentes motorisations les conduit ainsi à définir pour chaque carburant un mode d'intervention adapté en cas d'incident (fuite, incendie).

²² ADEME, Guide d'information sur les risques et les mesures de sécurité liés à la production décentralisée d'hydrogène, juin 2015

²³ ADEME, Guide d'information sur la sécurité des véhicules et des stations-service de distribution d'hydrogène, juin 2015

²⁴ INERIS, Rapport d'étude DRA-14-141532-06227C, Benchmark stations-service, septembre 2014

²⁵ Ministère de l'Intérieur, DGSCGC, Note d'information opérationnelle relative à l'intervention sur les installations d'hydrogène et les risques liés

²⁶ Vidéo relatant le témoignage du SDISS 50 sur le risque lié au véhicule hydrogène de type Kangoo ZE

²⁷ Ecole Nationale Supérieure des Officiers de Sapeurs-Pompiers, offre de formation

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition écologique et solidaire et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation. www.ademe.fr / @ademe

