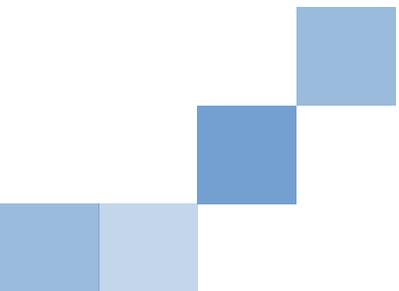


L'hydrogène énergie et les piles à combustible



ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie

FEUILLE DE ROUTE STRATÉGIQUE

Feuille de route l'hydrogène énergie et les piles à combustible

Sommaire

> 1. Champ de la feuille de route	4
> 2. Les enjeux	9
> 3. Les paramètres clés	10
> 4. Les visions 2050	11
> 5. Verrous et leviers	16
> 6. Visions 2020	19
> 7. Priorités de recherche, besoins de démonstrateurs	21
> 8. ANNEXE	26

Préambule

Depuis 2010, l'ADEME gère quatre programmes dans le cadre des Investissements d'avenir¹. Des groupes d'experts issus de la recherche dans les secteurs de l'industrie, des organismes de recherche et des agences de financement et de programmation de la recherche, sont chargés, dans le cadre d'un travail collectif, de la réalisation de feuilles de route stratégiques. Celles-ci sont utilisées pour lancer les Appels à manifestations d'intérêt (AMI).

Les feuilles de route ont pour objectif :

- d'éclairer les **enjeux industriels, technologiques, environnementaux et sociétaux** ;
- d'élaborer des **visions cohérentes et partagées** des technologies ou du système sociotechnique en question ;
- de mettre en avant les **verrous technologiques, organisationnels et socio-économiques** à dépasser ;
- d'associer aux thématiques de recherche prioritaires, **des objectifs temporels** en termes de disponibilité technologique et de déploiement ;
- de rendre prioritaires les **besoins de recherche industrielle, de démonstrateurs de recherche, d'expérimentation préindustrielle et de plates-formes technologiques d'essai** qui servent ensuite de base pour :
 - > la rédaction des AMI ;
 - > la programmation de la recherche au sein de l'ADEME et d'autres institutions comme l'Agence nationale de la recherche (ANR), le Comité stratégique national sur la recherche énergie ou l'Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie (ANCRE).

Ces priorités de recherche et d'expérimentation proviennent du croisement entre les visions et les verrous, mais prennent également en compte les **capacités françaises dans les domaines de la recherche et de l'industrie**. Les feuilles de route peuvent également faire référence à des expérimentations exemplaires à l'étranger et faire des recommandations en matière de politique industrielle.

Le cas échéant, ces feuilles de route peuvent également inclure une partie *benchmark* international se focalisant sur les démonstrateurs mis en œuvre dans les pays particulièrement actifs dans le domaine ainsi que des recommandations en matière de politique industrielle..

¹ - Les Investissements d'avenir s'inscrivent dans la continuité des orientations du Fonds démonstrateurs de recherche géré par l'ADEME. Les quatre programmes concernés sont : Energie renouvelable, décarbonée et chimie verte (1,35 milliard d'euros), Véhicules du futur (1 milliard d'euros), Réseaux électriques intelligents (250 millions d'euros) et Economie circulaire (250 millions d'euros).

Liste des membres du groupe d'experts²

Nature de l'organisme	Experts	Organismes
Entreprise privée	Pascal Moran et Eric Gernot Franck Masset Hélène Pierre et Stéphane Hody Marianne Julien Patrick Bouchard Alexandre Lima Marc Aubrée Bernard Declerck Michel Jehan Philippe Mulard et Daniel Le Breton Didier Grouset et Samuel Lucoq Patrick Maio, Jean-Christophe Lanoix, Perrine Tisserand	CETH ² PSA Peugeot Citroën GDF-Suez Air Liquide Hélion (Groupe Areva) Veolia Environnement France Telecom EDF McPhy Energy Total N-Ghy Hinicio
Association et collectivité territoriale	Pierre Beuzit et Michel Junker Frédéric Meslin Claude Derive Matthias Altman Hugo Vandenborre Jean-Marc Pastor Jérôme Biasotto	Alphéa Mission Hydrogène Pays de Loire AFH ³ Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST, Allemagne) V-Energy (Belgique) Sénateur du Tarn, Président de l'association Phyrenees Conseil régional de Rhône-Alpes
Organisme de recherche	Paul Lucchèse et Alain Le Duigou Claude Lamy Florent Petit Alexandre Rojey Cécile Barbier	CEA CNRS/Université de Poitiers Institut FC LAB IFP Energies Nouvelles UTT ⁴
Organisme public	Axel Strang Bernard Frois Daniel Clément, Karine Filmon, Loïc Antoine	MINEFI - MEDDLT / DGEC ⁵ ANR-NTE ⁶ ADEME

2 - La présente feuille de route s'appuie sur le travail réalisé par Hinicio, prestataire participant à l'animation des débats et au travail de rédaction. Le groupe d'experts a aussi reçu l'appui d'un secrétariat technique composé de Luc Bodineau et Michel Gioria de l'ADEME.

3 - Compagnie européenne des technologies de l'hydrogène.

4 - Association française de l'hydrogène.

5 - Université de technologie de Troyes.

6 - Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie – Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement / Direction générale de l'énergie et du climat.

7 - Agence nationale de la recherche - Nouvelles technologies de l'énergie.

Feuille de route l'hydrogène énergie et les piles à combustible

> 1. Champ de la feuille de route

Champ thématique

L'hydrogène énergie et les piles à combustible

La présente feuille de route recouvre deux thématiques : l'utilisation énergétique du gaz hydrogène et la technologie des piles à combustible.

Le gaz dihydrogène (H₂), plus communément appelé « hydrogène », peut être utilisé dans diverses applications en raison de son fort potentiel énergétique. N'existant pas à l'état naturel, il doit être fabriqué à partir d'une source d'énergie primaire, puis transporté, stocké et distribué vers l'utilisateur. On parle de **vecteur hydrogène** ou d'**hydrogène énergie**, comme vecteur énergétique entre une source primaire et son utilisation finale.

Cette feuille de route s'intéresse aux potentialités énergétiques de l'hydrogène, même si ce gaz est aujourd'hui majoritairement utilisé dans des applications industrielles en tant que composé chimique (*encadré ci-dessous*). Cet hydrogène industriel n'entre pas dans le présent champ thématique, mais sera pris en compte comme filière connexe existante.

Les filières hydrogène énergie et piles à combustible sont connexes. Elles peuvent être complémentaires, mais aussi se développer indépendamment l'une de l'autre. Par exemple, le développement de l'hydrogène énergie n'est pas une condition nécessaire à celui des piles à combustible et réciproquement.

Définitions

Hydrogène énergie : hydrogène utilisé pour couvrir des besoins énergétiques. Il est converti en électricité, en chaleur ou en force motrice selon l'usage final.

Hydrogène industriel : hydrogène utilisé comme composant chimique intervenant dans des procédés industriels, principalement le raffinage et la production d'ammoniac. De nouveaux procédés, dans le domaine de la sidérurgie et de la production de biocarburants de seconde génération, pourraient accroître à l'avenir ces usages industriels de l'hydrogène.

Piles à combustible : ces convertisseurs électrochimiques produisent électricité et chaleur par oxydation d'un carburant et réduction d'oxygène. Le carburant peut être un combustible liquide ou gazeux : hydrogène, gaz naturel, méthanol, éthanol, biogaz, gaz de pétrole liquéfié, essence, gazole. Leur taille varie du watt au mégawatt, allant des applications électroniques embarquées aux installations stationnaires industrielles.

Les applications de l'hydrogène énergie et des piles à combustible

L'hydrogène énergie et les piles à combustible peuvent trouver leur application dans de nombreux domaines.

Applications stationnaires

Dans le domaine des bâtiments résidentiels et tertiaires, de l'industrie et des réseaux, ces technologies peuvent permettre de stocker l'énergie et d'assurer la fourniture d'électricité et de chaleur : micro cogénération (quelques kilowatts (kW)), moyenne cogénération (quelques dizaines à quelques centaines de kW), cogénération de forte puissance (plusieurs mégawatts (MW)). Elles peuvent ainsi contribuer au développement des bâtiments et îlots de bâtiments à énergie positive – qui produisent plus d'énergie qu'ils n'en consomment –, ainsi qu'aux réseaux électriques intelligents ou *smart grid* – qui utilisent les technologies de l'information et de la communication pour optimiser la production et la distribution d'électricité et mieux mettre en relation l'offre et la demande entre producteurs et consommateurs.

Applications mobiles

L'hydrogène peut alimenter certains véhicules équipés de moteur à combustion interne fonctionnant au gaz, comme les bus ou les bennes à ordures ménagères. Le mélange 20 % hydrogène/80 % gaz naturel (Hythane®) ne nécessite qu'une adaptation mineure des moteurs actuels.

Les piles à combustible peuvent équiper tout véhicule utilisant l'énergie électrique comme force motrice de traction, dans tous les domaines de transport : terrestre, maritime, fluvial, ferroviaire, aéronautique. Dans le domaine des véhicules particuliers, leur application en mode hybride – faisant appel à plusieurs sources d'énergie – couplé à des batteries semble pertinente : l'intégration d'un réservoir d'hydrogène et d'une pile à combustible à bord d'un véhicule électrique permet d'accroître son autonomie et de réduire le temps de recharge (on parle d'électro-mobilité de deuxième génération ou 2G (la première génération étant les véhicules électriques en cours de développement)). Le degré d'hybridation peut être adapté selon l'usage et la gamme du véhicule.

Applications de niche ou marchés précoces

Au-delà de ces usages génériques, l'utilisation de l'hydrogène et des piles à combustible a d'abord été démontrée pour des usages de niche, plus spécifiques, dits marchés précoces, car ils correspondent aux applications les plus proches de la commercialisation :

- engins de manutention équipant des centres logistiques, des aéroports ; véhicules spéciaux pour des usages urbains ou dans des bâtiments ;
- fourniture de courant pour sites isolés, comme les antennes relais et les bases de télécommunication ;

- groupes électriques de secours pour des usages critiques ou stratégiques (serveurs informatiques, hôpitaux, relais des télécommunications) ou, plus largement, en soutien aux réseaux électriques défaillants, comme dans les pays émergents.
- applications nomades : les piles de petite puissance peuvent être utilisées comme moyens d'alimentation portable ou intervenir dans l'alimentation électrique d'objets nomades, comme les téléphones, les ordinateurs, les baladeurs, les dispositifs d'éclairage portatifs.

La figure 1 ci-dessous résume l'état de maturité de ces différentes applications.

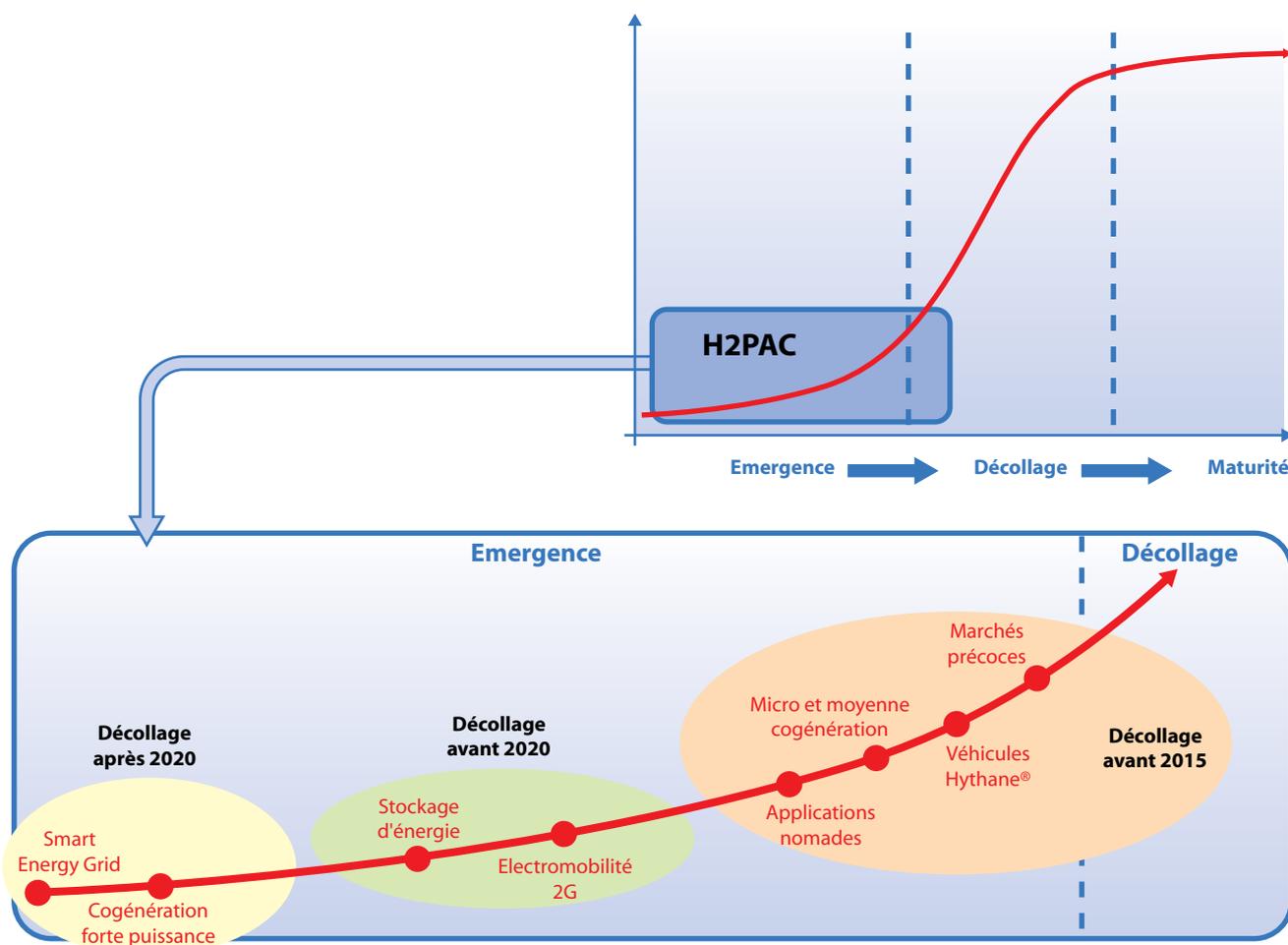


Figure 1 : Degré de maturité des applications du vecteur hydrogène et des piles à combustible (source : groupe d'experts)

Feuille de route l'hydrogène énergie et les piles à combustible

La production de l'hydrogène

La molécule de dihydrogène n'est pas un produit naturellement disponible, bien que l'atome d'hydrogène entre dans la composition chimique de différents corps comme le méthane, l'eau, ou toute matière organique. On doit donc produire ce gaz à travers des procédés qui utilisent des sources primaires différentes, renouvelables ou non :

- Le vaporeformage⁸ du gaz naturel est le procédé couramment employé aujourd'hui. Il génère du dioxyde de carbone, qui pourrait à l'avenir être capté puis stocké ou valorisé (filiale CSCV : captage, stockage et valorisation du CO₂). L'hydrogène peut également être produit par ce procédé à partir de biogaz.
- L'électrolyse de l'eau correspond à la réaction inverse de celle qui a lieu dans une pile à combustible utilisant de l'hydrogène :



On distingue les électrolyses basse température ou BT (< 200 °C) des électrolyses haute température ou HT (> 400 °C) qui nécessitent un apport de chaleur plus important. Les premières utilisent deux types d'électrolytes : une solution alcaline ou une membrane polymère échangeuse de protons (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell* ou PEMFC). Les électrolyses haute température utilisent une membrane céramique conductrice d'ions oxygène (*Solid Oxide Fuel Cell* ou SOFC).

- Les procédés thermochimiques de gazéification et de pyrolyse de biomasse solide. Ils produisent un mélange de gaz (monoxyde de carbone et hydrogène) dont on peut extraire l'hydrogène.

D'autres procédés font également l'objet de recherches plus amont : la décomposition thermochimique de l'eau, la décomposition photochimique de l'eau, la production par voie biologique à partir d'algues et de bactéries.

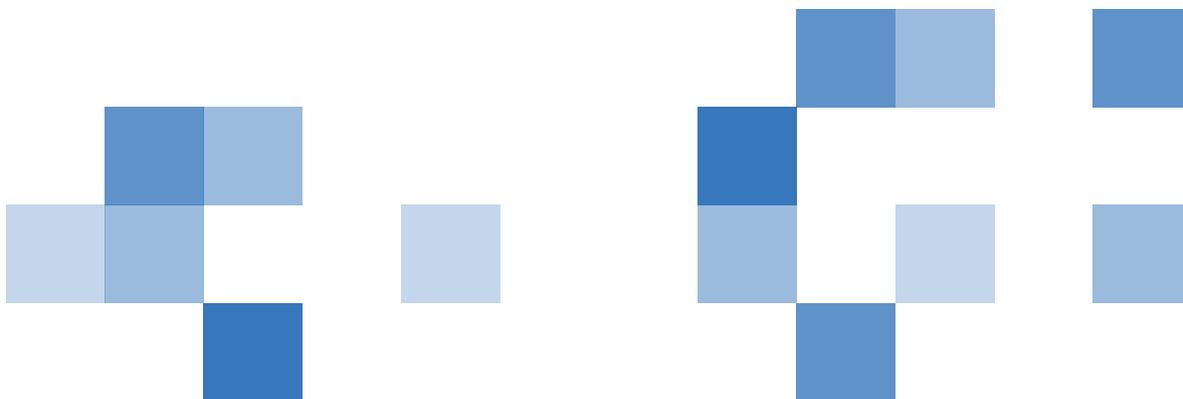
Aujourd'hui, l'hydrogène est également coproduit dans certains procédés chimiques (production de chlore, cokerie, pétrochimie, etc...). Cet hydrogène est soit valorisé dans un procédé, soit brûlé, soit rejeté.

Dans la suite du document, on distinguera **l'hydrogène bas carbone** et **l'hydrogène renouvelable**, dénominations qui s'appuient sur la nature de la source primaire et/ou le procédé utilisés pour produire l'hydrogène (*encadré ci-dessous*)

Différentes sources et procédés de production

Hydrogène bas carbone : hydrogène produit à partir d'électricité d'origine nucléaire, d'une source d'énergie renouvelable (électricité renouvelable, biomasse solide, biogaz), ou par vaporeformage de gaz naturel associé à une unité de CSCV. Le contenu carbone de l'hydrogène produit, ou émissions de gaz à effet de serre générées par la fabrication, est réduit voire nul.

Hydrogène renouvelable : hydrogène produit à partir d'une source d'énergie renouvelable (électricité renouvelable, biomasse, biogaz).



8 - Procédé de dissociation de molécules carbonées en présence de vapeur d'eau et de chaleur.

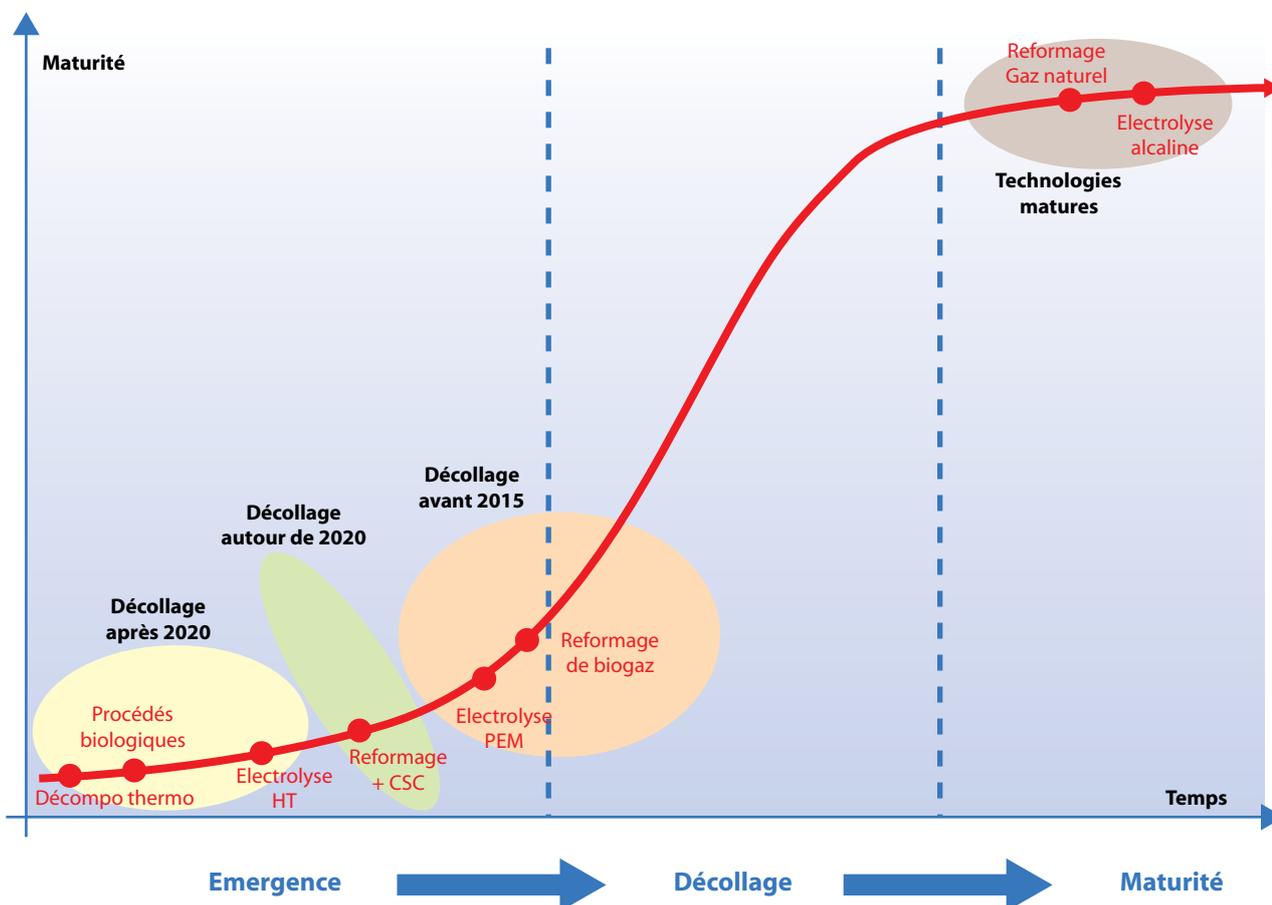


Figure 2 : Degré de maturité des technologies de production d'hydrogène et perspectives de développement (source : groupe d'experts)

Le transport, le stockage et la distribution

L'acheminement de l'hydrogène, de son point de production à l'utilisateur final, nécessite une chaîne de transport, de stockage et de distribution. La faible densité énergétique de l'hydrogène par unité de volume est une contrainte et un paramètre clé dans la définition de cette chaîne.

L'acheminement sous forme gazeuse – par compression du gaz à différents niveaux de pression, de quelques dizaines de bars à 350 ou 700 bars – semble être l'option la plus pertinente. La liquéfaction de l'hydrogène à - 253 °C étant très énergivore, cette voie devrait rester une option de niche. Le stockage de l'hydrogène dans des matrices solides, notamment par absorption dans les hydrures métalliques offre des solutions alternatives en cours de développement.

Les équipements et infrastructures peuvent prendre des formes variées, les volumes d'hydrogène à transporter et la distance d'acheminement étant les deux facteurs discriminants : bouteilles métalliques, réservoirs composites, camions-citernes, hydrogénoducs (canalisations dédiées au transport de l'hydrogène, il en existe 1 500 km en Europe), stations-service sur site, etc...

Le réseau de gaz naturel peut par ailleurs contenir de l'hydrogène jusqu'à 20 % en volume, sans modifications particulières. Certains verrous technologiques restent cependant à lever afin de séparer et purifier l'hydrogène en aval du réseau.

Feuille de route l'hydrogène énergie et les piles à combustible

Champ géographique et temporel

De l'international au local

Les visions, les priorités de recherche, les besoins de démonstrateurs de recherche, de démonstrateurs industriels, de plates-formes et d'expérimentations technologiques identifiés ici ont une dimension nationale. Cependant, lorsque cela est pertinent, des dimensions locales, européennes et internationales sont introduites :

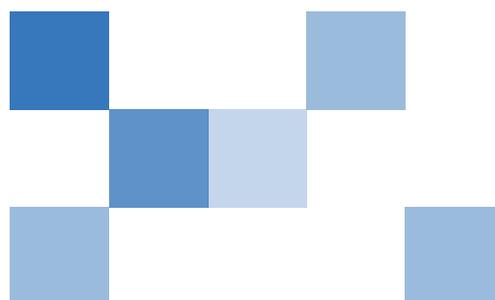
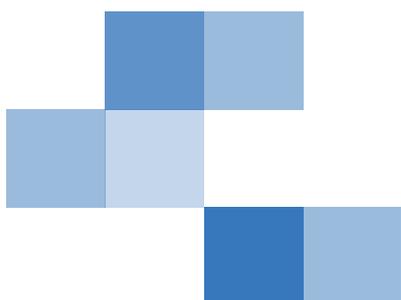
- l'état de l'art international et les initiatives étrangères en termes de priorités de recherche et de soutien au développement technologique, tels les programmes H₂ Mobility et Callux en Allemagne, le *Japanese Large Scale Fuel Cell Demonstration Programme* ou le *US National Hydrogen & Fuel Cell Program*, seront pris en compte (voir détails en annexe).
- pour certaines applications, les perspectives de développement et de marché ont un horizon nécessairement international : automobiles, secours électrique aux réseaux défaillants, applications nomades.
- certaines caractéristiques d'ordre territorial apparaissent par ailleurs déterminantes pour d'autres applications : présence de réseaux électriques et/ou gaziers, disponibilité de ressources renouvelables, contraintes climatiques et topographiques.

Horizons temporels

Une analyse à l'horizon 2050, fondé sur l'objectif de division par quatre de nos émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050 par rapport à leur niveau de 1990 (facteur 4⁹), permet de dégager, dans un premier temps, des visions contrastées sur les potentialités de déploiement de la filière aux plans technologique, organisationnel et socio-économique.

Les objectifs européens « 20/20/20 »¹⁰ et les orientations données par la Loi de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement donnent un cadre à l'horizon 2020 – efficacité énergétique dans les bâtiments, développement des énergies renouvelables, réduction des nuisances, évolution des réseaux énergétiques – dans lequel des axes stratégiques de développement de l'hydrogène énergie et des piles à combustible peuvent être définis.

L'identification de certains verrous permet enfin d'établir des priorités de recherche et des points de passage intermédiaires à l'horizon 2015, aux plans technico-économique et organisationnel.



9 - Cet objectif a été repris dans l'article 2 de la loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique française (13 juillet 2005).

10 - Objectifs à l'horizon 2020 : réduction de 20 % des émissions de gaz à effet de serre, réduction de 20 % de la consommation d'énergie primaire, part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie égale à 20 %.

> 2. Les enjeux

Contribuer à garantir l'indépendance énergétique nationale et à préserver les ressources en favorisant le recours aux sources renouvelables pour les usages finaux de l'énergie

L'hydrogène renouvelable produit à partir de sources d'énergies disponibles sur le territoire national apparaît comme un moyen de stocker, transporter ou distribuer ces énergies par nature diffuses et intermittentes, et faciliter ainsi leur valorisation.

La transformation finale de l'hydrogène via les piles à combustible produit, à différentes échelles possibles, électricité et chaleur, ce qui permet d'utiliser l'hydrogène dans les principaux usages énergétiques : mobilité, usages spécifiques de l'électricité, besoins thermiques dans les bâtiments. L'hydrogène accroît ainsi les potentialités de substitution entre sources d'énergies conventionnelles et renouvelables.

Les bénéfices énergétiques générés par le vecteur hydrogène dépendent en partie du rendement global de la chaîne énergétique, entre production et usage final. L'optimisation de cette chaîne apparaît dès lors comme un facteur de premier ordre déterminant les potentialités énergétiques de l'hydrogène.

Participer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre liées aux usages finaux de l'énergie par l'emploi d'un vecteur énergétique bas carbone

Le contenu de l'hydrogène en gaz à effet de serre dépend majoritairement de la source énergétique primaire dont il est issu. Il est réduit dans le cas de sources d'énergies renouvelables ou nucléaires. Son emploi, en substitution d'énergies fossiles dans les usages énergétiques finaux, et plus spécifiquement dans les usages diffus, générera des réductions nettes d'émissions de gaz à effet de serre.

Accompagner l'évolution des réseaux énergétiques, en favorisant le stockage et la gestion des intermittences, et en permettant des interconnexions entre ces réseaux

L'architecture et le mode de régulation des réseaux électriques sont amenés à évoluer. L'intelligence croissante des échanges entre systèmes de production, transport, distribution et sites de consommation, autorisera un haut degré d'automatisation des réseaux ainsi qu'une gestion avancée de la production et de la charge électrique. Le déploiement des sites de production d'électricité décentralisés s'accompagnera par ailleurs d'une évolution du jeu d'acteurs intervenant dans la régulation.

L'hydrogène énergie et les piles à combustible offrent des capacités de stockage et de production d'électricité à la demande qui peuvent permettre de mieux gérer l'intermittence des énergies renouvelables. Ils contribuent ainsi à l'évolution des réseaux électriques à différentes échelles : bâtiment, îlot, quartiers, parcs de production renouvelable.

Le vecteur hydrogène peut également interagir avec le réseau de transport ou de distribution locale de gaz naturel. Il offre ainsi des possibilités d'interconnexions entre réseaux électriques, réseaux de gaz naturel et sources d'énergies renouvelables, contribuant à une régulation plus évoluée de la production et de la distribution des différentes formes d'énergies finales.

Réduire les nuisances liées aux usages énergétiques, notamment en milieu urbain

La mobilité en milieux urbain et périurbain, reposant sur la technologie des moteurs à combustion interne, est confrontée aux problématiques des nuisances locales : émissions de polluants comme les particules, les oxydes d'azote et composés organiques volatils, génération de nuisances sonores. La pile à combustible, associé au véhicule électrique, constitue une solution technologique de rupture.

Contribuer à l'amélioration de l'efficacité énergétique dans le domaine des bâtiments

Les usages de l'énergie au sein des bâtiments tertiaires et résidentiels évoluent fortement. L'électricité prend une place croissante dans les besoins énergétiques, liée au développement de nouveaux services et à l'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe des bâtiments. Par ailleurs, la production et le stockage d'énergie à l'échelle du bâtiment ou de l'îlot de bâtiments pourraient se généraliser.

Dans ce contexte, la technologie des piles à combustible, associée à l'hydrogène ou au gaz naturel, peut contribuer à assurer les besoins énergétiques avec un rendement de conversion élevé. La production de chaleur, supérieure à la production d'électricité répond à l'évolution observée et attendue des usages au sein des bâtiments.

Flexibilité et modularité

Les potentialités énergétiques et environnementales de l'hydrogène énergie reposent principalement sur la flexibilité et la modularité de ce vecteur énergétique. Pouvant être produit à partir de différentes sources primaires, transporté, stocké et valorisé à des échelles très variables, son emploi est possible pour de nombreux usages finaux de l'énergie.

Feuille de route l'hydrogène énergie et les piles à combustible

> 3. Les paramètres clés

Les visions à long terme ont vocation à décrire, de manière extrême, les modalités de déploiement des options technologiques, organisationnelles et socio-économiques qui, selon le groupe d'experts, permettraient à l'hydrogène et aux piles à combustible de contribuer à atteindre des objectifs ambitieux tels que le facteur 4.

Ces visions n'ont pas pour objet de décrire ce que sera la réalité à l'horizon 2050, mais de définir le champ des possibles pour ensuite en déduire un large ensemble de verrous, de priorités de recherche et de besoins de démonstrateurs. La réalité de 2050 sera très probablement une combinaison des visions établies dans cette feuille de route.

Deux paramètres clés ont été identifiés par le groupe d'experts, permettant de compartimenter les réalités possibles de 2050 en quatre visions contrastées :

Premier paramètre : La production d'hydrogène

La multiplicité des procédés possibles de production d'hydrogène permet d'imaginer différentes échelles ou degré de centralisation dans leur mise en œuvre. De manière extrême, deux logiques d'infrastructures se distinguent :

Production centralisée :

L'hydrogène est produit en grande quantité, sur un nombre restreint de sites. Les installations de grandes capacités reposent sur les procédés suivants :

- le vaporeformage du gaz naturel avec CSCV,
- l'électrolyse haute et basse température, sur site d'utilisation ou adossée à des sites de production d'électricité de grande taille (parcs éoliens en mer, centrales nucléaires),
- la gazéification de la biomasse et le vaporeformage du biogaz,
- de nouveaux procédés de production massive : décomposition thermochimique de l'eau, procédés biologiques.

Production décentralisée :

La production de l'hydrogène est assurée par de nombreuses installations de petites et moyennes tailles, dispersées sur le territoire. Les moyens de production mettent en œuvre les procédés suivants :

- la gazéification de la biomasse et le vaporeformage du biogaz,
- l'électrolyse, connectée au réseau ou adossée à des parcs de production d'électricité renouvelable de petite et moyenne taille,
- de nouveaux procédés : décomposition photochimique de l'eau, procédés biologiques.

Second paramètre : Les usages

La flexibilité et la modularité du vecteur hydrogène et des technologies des piles à combustible permettent également d'envisager des applications à différentes échelles, mettant en œuvre des volumes plus ou moins importants d'hydrogène :

Usages concentrés :

L'hydrogène peut être utilisé en grande quantité sur un nombre restreint de sites, à des fins industrielles et énergétiques :

- usages industriels : raffinage des carburants, production de biocarburants, carburants de synthèse, industrie chimique, sidérurgie.
- production d'électricité et de chaleur en usage stationnaire : cogénération de forte puissance (> 50 MW) mettant en œuvre des piles à combustible valorisant de l'hydrogène ou d'autres combustibles (type Hythane®, biogaz).

Usages diffus :

De petites quantités d'hydrogène sont consommées de manière dispersée sur le territoire. Les piles à combustible sont utilisées pour des applications stationnaires et mobiles diffuses :

- micro et moyenne cogénération (de 1 kW à 1 MW) dans le domaine des bâtiments et de l'industrie, fonctionnant à partir d'hydrogène, de gaz naturel, de mélange type Hythane®, de biogaz.
- véhicules terrestres, maritimes ou fluviaux équipés de piles à combustible associées à une traction électrique, ou valorisant du mélange type Hythane® en moteur à combustion interne.
- applications diffuses diverses : objets nomades, véhicules spéciaux, groupes de secours...

La combinaison de ces deux paramètres aboutit à définir quatre visions extrêmes (décrites dans la figure 3 ci-dessous) qui sont autant de possibilités de configuration à l'échelle nationale.

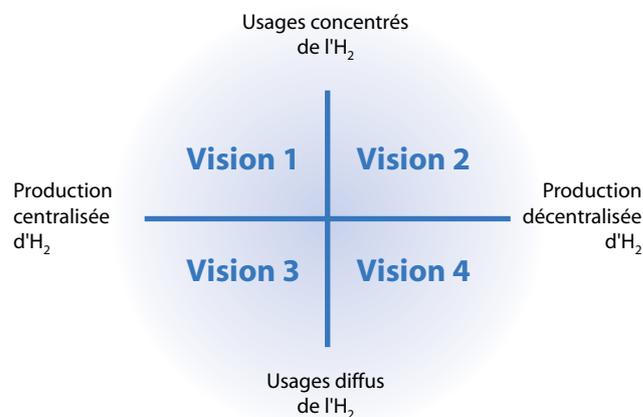


Figure 3 : Positionnement des visions 2050 selon les paramètres clés

> 4. Les visions 2050

Chaque vision, caractérisée par un mode de production de l'hydrogène et des types d'usages de l'hydrogène et des piles à combustible, se traduit par des infrastructures qui lui sont propres. Les tableaux suivants détaillent, pour chaque vision, ce que pourraient être ces infrastructures, en citant les interactions possibles avec les autres filières énergétiques et les principaux enjeux socio-économiques.

Vision 1 : hydrogène bas carbone pour l'industrie

HYPOTHESES	Production d'hydrogène CENTRALISEE	<ul style="list-style-type: none"> • Reformage du gaz naturel avec captage et stockage du CO₂ • Electrolyse haute et basse température (sur site d'utilisation ou adossée à des sites de production d'électricité de grande taille notamment les parcs d'éolien en mer et les centrales nucléaires) • Gazéification de la biomasse et reformage de biogaz • Nouveaux procédés (décomposition thermo-chimique de l'eau, procédés biologiques)
	Usages de l'hydrogène CONCENTRES	<ul style="list-style-type: none"> • Usages industriels : raffinage des carburants classiques, biocarburants, carburants de synthèse, industrie chimique, sidérurgique, etc. • Cogénération de forte puissance (> 50 MW). • Unités de micro et moyenne cogénération à piles à combustible fonctionnant au gaz naturel ou au biogaz.
CONSEQUENCES	Infrastructure	<ul style="list-style-type: none"> • Infrastructure réduite au minimum, limitée aux sites industriels avec, dans certains cas, des interconnexions de courtes distances par gazoducs (hydrogénoducs dédiés ou en mélange avec du gaz naturel) entre certains sites • Stockage : besoins limités grâce à la connaissance fine de l'offre et de la demande. Capacités de stockage de masse tampon à prévoir lorsque l'hydrogène provient d'énergies renouvelables ou de source nucléaire.
	Interactions et synergies avec les autres filières énergétiques	Synergies avec les filières CSCV et production de biomasse, biocarburants de seconde génération et autres carburants de synthèse, avec les énergies renouvelables, le parc nucléaire et le réseau électrique, le réseau et les usages de gaz naturel notamment dans le bâtiment.
	Compétences et acteurs	Rôle important des producteurs et distributeurs historiques d'énergie et d'hydrogène ainsi que de la filière CSCV. Compétences spécifiques aux piles : micro, moyenne et forte cogénération
	Aspects économiques	<ul style="list-style-type: none"> • Importance des prix du carbone, du gaz naturel et de l'électricité • Apparition possible d'un véritable marché de l'hydrogène
	Aspects sociétaux	Pas de changement dans les habitudes de vie

Cette vision est la plus proche de la situation présente et nécessitera peu d'évolution dans le schéma économique actuel. Elle est en partie conditionnée par la mise en place des technologies de CSCV. Elle est aussi dépendante de l'évolution de la filière des biocarburants.

Les avancées technologiques nécessaires concernent essentiellement la production massive d'hydrogène : électrolyse haute et basse température, CSCV. La cogénération par piles à combustible devra aussi avoir prouvé son potentiel : les technologies actuelles devront être améliorées en termes d'adaptation aux usages (flexibilité, fiabilité, contrôle à distance)

et en termes de coûts (modèles économiques viables pour la micro, moyenne et grosse cogénération).

Le principal verrou réside dans la volonté des industriels de mettre en place des procédés de production massive d'hydrogène bas carbone. Le marché du carbone et le développement du Système communautaire d'échange de quotas d'émissions (SCEQE) seront des incitations fortes au même titre que les futurs choix politiques sur ces questions environnementales. La contrainte carbone devra donc s'accroître fortement pour inciter les industriels à prendre le virage de la production d'hydrogène bas carbone.

Feuille de route l'hydrogène énergie et les piles à combustible

Vision 2 : hydrogène renouvelable pour l'industrie

HYPOTHESES	Production d'hydrogène DECENTRALISEE	<ul style="list-style-type: none"> Gazéification de la biomasse et reformage de biogaz Electrolyse haute et basse température (adossée à des parcs de production d'énergie renouvelable de petite et moyenne taille et/ou connectée au réseau) Nouveaux procédés (décomposition photochimique, procédés biologiques)
	Usages de l'hydrogène CONCENTRES	<ul style="list-style-type: none"> Usages industriels : raffinage des carburants classiques, biocarburants, carburants de synthèse, industrie chimique, sidérurgique, etc. Cogénération de forte puissance (> 50 MW). Unités de micro et moyenne cogénération à piles à combustible fonctionnant au gaz naturel ou au biogaz.
CONSEQUENCES	Infrastructure	<ul style="list-style-type: none"> Présence d'une infrastructure permettant de collecter l'hydrogène sur une multitude de sites de production diffuse pour l'acheminer vers des sites d'utilisation concentrée. Utilisation du réseau de gaz naturel existant et construction d'un réseau d'hydrogénoducs dédiés. Existence de petites et grandes capacités de stockage, proches des sites de production et de consommation
	Interactions et synergies avec les autres filières énergétiques	Synergies avec les filières biocarburants de seconde génération et autres carburants de synthèse, le réseau et les usages du gaz naturel notamment dans le bâtiment, la filière biomasse, les énergies renouvelables et le réseau électrique.
	Compétences et acteurs	<ul style="list-style-type: none"> Nouvelles compétences nécessaires : production décentralisée, transport et stockage d'hydrogène, production d'électricité et de chaleur via la cogénération. Nouveaux acteurs : petits producteurs d'énergies renouvelables, exploitants de gisement de biomasse, intermédiaires entre les producteurs locaux d'hydrogène et les sites d'utilisation concentrée. Apparition possible d'opérateurs locaux chargés de l'ajustement entre les différents vecteurs énergétiques (électricité, gaz naturel et hydrogène).
	Aspects économiques	<ul style="list-style-type: none"> Prix de l'hydrogène suffisamment élevé pour rentabiliser les investissements élevés dans les infrastructures Développement d'un marché national ouvert
	Aspects sociétaux	Pas de changement dans les habitudes de vie, mais proximité des moyens de production

Dans cette vision, les solutions utilisant l'hydrogène seront développées si le coût de l'hydrogène est suffisamment compétitif et si son utilisation entraîne un gain en termes d'émissions de gaz à effet de serre (mélangé au gaz naturel notamment). Comme pour la vision 1, la contrainte carbone imposée par le SCEQE sur les activités industrielles est déterminante. Cette vision nécessite aussi un profond changement dans la stratégie des grands industriels concernant leur fourniture en hydrogène, qui s'approvisionnent de manière diffuse sur le territoire. De plus, le développement indispensable d'une infrastructure de stockage et de distribution à grande échelle influencera le coût.

Cette vision semble moins probable aujourd'hui que la vision précédente. L'injection d'hydrogène dans le réseau de gaz naturel peut néanmoins être une solution économique transitoire, car elle permet de contourner la nécessité d'investissement en infrastructures nouvelles.

Vision 3 : hydrogène bas carbone en réseau national

HYPOTHESES	
Production d'hydrogène CENTRALISEE	<ul style="list-style-type: none"> • Reformage du gaz naturel avec captage et stockage du CO₂ • Electrolyse haute et basse température (sur site d'utilisation ou adossée à des sites de production d'électricité de grande taille, notamment les parcs d'éolien en mer et les centrales nucléaires) • Gazéification de la biomasse et reformage de biogaz • Nouveaux procédés (décomposition thermochimique de l'eau, procédés biologiques)
Usages de l'hydrogène DIFFUS	<ul style="list-style-type: none"> • Transport : véhicules terrestres ou navires électriques (pile à combustible seule et/ou en hybridation avec des batteries), véhicules thermiques utilisant un mélange type Hythane® • Micro et moyenne cogénération (hydrogène, gaz naturel, biomasse, biogaz) • Fourniture d'énergie aux objets nomades (micro-ordinateurs, téléphones, objets multimédias) • Générateurs de courant de secours (data center, hôpitaux, etc.) • Groupes auxiliaires de puissance (applications aéronautiques, secteur maritime) • Usages d'hydrogène chez les petits industriels
CONSEQUENCES	
Infrastructure	Gestion centralisée top-down de la fourniture en énergie, très similaire à l'architecture actuelle des réseaux énergétiques : <ul style="list-style-type: none"> • Réseau de gaz naturel pour le transport et la distribution d'hydrogène en mélange avec le gaz naturel (type Hythane®). • Réseau d'hydrogénéoducs • Réseau de transport (routier, ferroviaire, fluvial) pour la distribution d'hydrogène liquide et/ou gazeux • Réseau de stations-service à hydrogène et/ou de type Hythane® pour l'approvisionnement des véhicules.
Interactions et synergies avec les autres filières énergétiques	Synergies avec les filières CSCV et production de biomasse, avec les énergies renouvelables, le parc nucléaire et le réseau électrique, le réseau de gaz naturel, notamment dans le bâtiment, le véhicule électrique et le gaz naturel pour véhicules
Compétences et acteurs	<ul style="list-style-type: none"> • Nouvelles compétences : production d'hydrogène bas carbone, gestion de macro réseaux d'hydrogène et d'énergie. • Rôle important des grands acteurs énergéticiens dans la gestion des macro-réseaux (smart energy grid) et la fourniture de services énergétiques globaux (électricité, gaz, hydrogène, chaleur) • Rôle important des producteurs et distributeurs historiques d'énergie et d'hydrogène ainsi que de la filière CSCV.
Aspects économiques	• Apparition d'un marché ouvert de l'hydrogène
Aspects sociétaux	Généralisation des contacts des usagers avec les applications hydrogène et piles

Cette troisième vision correspond à une gestion centralisée top-down de la fourniture en énergie finalement très similaire à l'architecture actuelle des réseaux énergétiques. Toutefois, l'intégration de l'hydrogène dans le futur mix énergétique selon cette configuration, nécessite un profond changement du marché de l'énergie. L'interconnexion des différents réseaux énergétiques rend leur gestion simultanée et intégrée nécessaire, les infrastructures de réseaux de distribution d'hydrogène jusqu'aux usages diffus représentant par ailleurs un investissement important.

Le développement à grande échelle de l'hydrogène en tant que nouveau vecteur énergétique rend par ailleurs nécessaire une volonté politique forte sur le modèle des grands projets ainsi que des mécanismes de soutien adaptés, notamment pour le déploiement de l'infrastructure. Le coût du carbone et les autres types d'incitations jouent un rôle prépondérant pour l'émergence de cette vision.

Feuille de route l'hydrogène énergie et les piles à combustible

Aux avancées technologiques déjà décrites dans la première vision (production d'hydrogène par électrolyse, CSCV, nouveaux procédés de production massive, cogénération), viennent s'ajouter d'autres verrous technologiques liés aux usages, en particulier dans le transport. Le stockage d'hydrogène devra aussi faire l'objet d'études et d'expérimentations afin de déterminer les modes de stockage (massif versus diffus), les technologies adaptées à chaque application, leur localisation et leur dimensionnement optimaux.

Etant donné l'omniprésence des nouvelles applications de l'hydrogène dans la vie quotidienne des citoyens, la gestion de l'adhésion sociétale devient fondamentale.

Vision 4 : une économie locale de l'hydrogène renouvelable maille le territoire

HYPOTHESES	Production d'hydrogène DECENTRALISEE	<ul style="list-style-type: none"> Gazéification de la biomasse et reformage de biogaz Electrolyse haute et basse température (adossée à des parcs de production d'énergies renouvelables de petite et moyenne taille et/ou connectée au réseau) Nouveaux procédés (décomposition photochimique, procédés biologiques)
	Usages de l'hydrogène DIFFUS	<ul style="list-style-type: none"> Transport : véhicules terrestres ou navires électriques (pile à combustible seule et/ou en hybridation avec des batteries), véhicules thermiques utilisant un mélange type Hythane® Micro et moyenne cogénération (hydrogène, gaz naturel, biomasse, biogaz) Fourniture d'énergie aux objets nomades (micro-ordinateurs, téléphones, objets multimédia) Générateurs de courant de secours (data center, hôpitaux, etc.) Groupes auxiliaires de puissance (applications aéronautiques, secteur maritime, etc.) Usages d'hydrogène chez les petits industriels
CONSEQUENCES	Infrastructure	Production diffuse disséminée sur le territoire et proche du lieu d'utilisation : <ul style="list-style-type: none"> Micro réseaux à l'échelle d'une ville ou d'un département Utilisation des boucles locales de gaz naturel Réseau de stations-service à hydrogène et/ou type Hythane® afin de permettre l'approvisionnement des véhicules utilisant ces combustibles Dispositifs de production d'hydrogène directement installés chez les particuliers ou dans les stations-service Capacités de stockage diffuses
	Interactions et synergies avec les autres filières énergétiques	Synergies avec la filière biomasse, les énergies renouvelables et le réseau électrique, le réseau de gaz naturel, notamment dans le bâtiment, le véhicule électrique et le gaz naturel pour véhicules
	Compétences et acteurs	<ul style="list-style-type: none"> Nouvelles compétences : production décentralisée, transport et stockage de l'hydrogène, production d'électricité et de chaleur via la cogénération, gestion de microréseaux Rôle important des petits producteurs d'électricité et des exploitants de sites de biomasse, des acteurs locaux (PME et collectivités territoriales) et des gros industriels bénéficiant d'une forte composante locale
	Aspects économiques	<ul style="list-style-type: none"> Importance du coût du stockage
	Aspects sociétaux	Généralisation des contacts des usagers avec les applications hydrogène et piles, proximité des usagers des sites de production et des réseaux de distribution

La vision 4 correspond à une situation de décentralisation des prises de décision dans le domaine énergétique. L'intégration des différents vecteurs énergétiques (électricité, gaz, hydrogène) permet l'optimisation de la gestion de microréseaux énergétiques en fonction de la demande en énergie et des

disponibilités locales (en biomasse, gaz naturel, électricité). Ceci nécessite une transformation profonde des marchés de l'énergie, ce qui ne peut résulter que d'une volonté politique forte, tant au niveau national que local.

Concernant la question des coûts de déploiement de l'infrastructure, cette vision rend possible des économies de nombre par opposition à la vision 3, dans laquelle ce sont les économies d'échelle qui dominent. Le risque est aussi plus faible que dans la vision 3, car les investissements sont de plus petite taille et peuvent être supportés par un plus grand nombre d'acteurs.

La levée des verrous technologiques décrits dans les visions 2 et 3 (production d'hydrogène par électrolyse, nouveaux procédés de production décentralisée, cogénération, stockage diffus d'hydrogène, véhicules à hydrogène) est nécessaire pour l'émergence de cette vision.

Tout comme dans la vision 3, les avantages de l'hydrogène en termes de flexibilité et de modularité doivent être exploités et les questions sociétales de faisabilité traitées de manière prioritaire.

Récapitulatif

De manière caricaturale, comme l'illustre la figure 4 ci-dessous, les quatre visions 2050 se distinguent ainsi selon :

- le type d'usage de l'hydrogène : les visions 1 et 2 correspondent à l'hydrogène industriel, les visions 3 et 4 à l'hydrogène énergie.
- la nature de l'hydrogène valorisé : les visions 1 et 3 valorisent l'hydrogène bas carbone, les visions 2 et 4 l'hydrogène renouvelable.

Cette caractérisation du champ des possibles appelle les deux remarques suivantes :

- les applications hydrogène énergie sont nécessairement diffuses et ne concernent finalement que deux des quatre visions énoncées. Les usages industriels, s'ils ne sont pas l'objet de cette feuille de route, comptent comme scénario référence et peuvent donner lieu à l'émergence d'une production d'hydrogène bas carbone ou renouvelable,
- le déploiement des piles à combustible tirera parti des usages diffus de l'hydrogène énergie (visions 3 et 4), mais est également possible en dehors de ces scénarios. La valorisation d'autres combustibles (gaz naturel, biogaz) leur permet de trouver des applications malgré un usage industriel de l'hydrogène (visions 1 et 2).

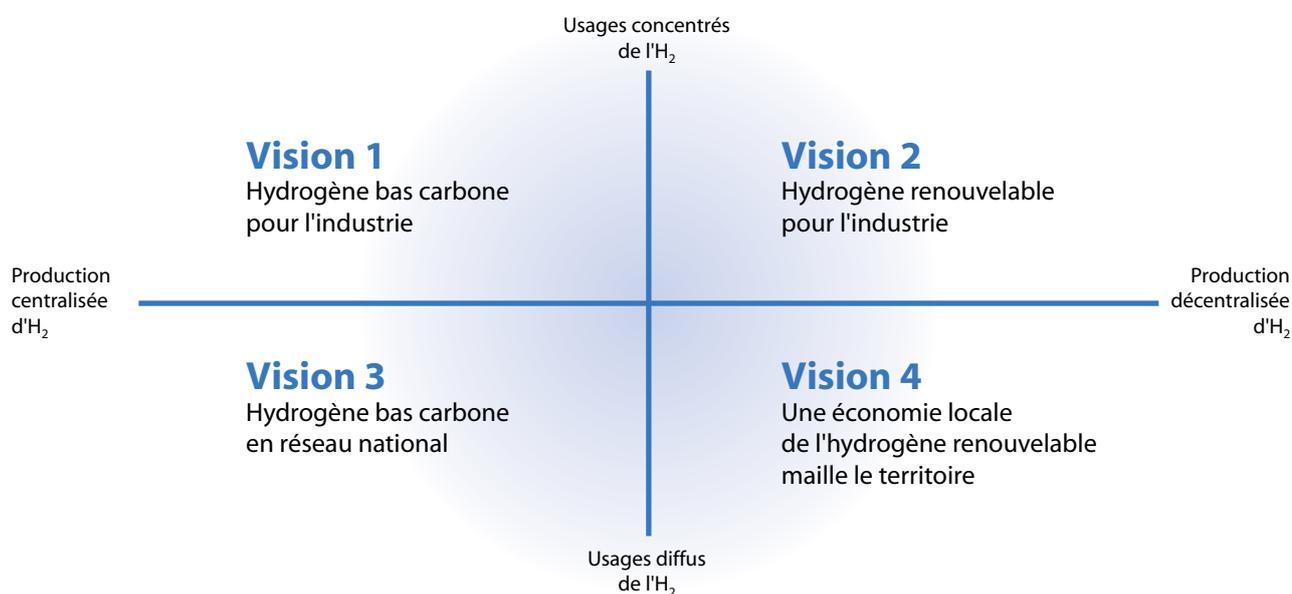


Figure 4 : Quatre visions en 2020

Feuille de route l'hydrogène énergie et les piles à combustible

> 5. Verrous et leviers

Certains éléments de contexte, externes à la filière hydrogène énergie et piles à combustible, influenceront plus particulièrement le déploiement de ces technologies au plan national. La contrainte carbone, ainsi que les prix des énergies fossiles et de l'électricité, interviendront tout d'abord dans la compétitivité de ces applications. Celles-ci s'intégreront par ailleurs dans des systèmes énergétiques nationaux qui évolueront sous l'influence d'autres technologies et d'autres facteurs : degré de décentralisation, déploiement des énergies renouvelables (EnR), pénétration des véhicules électriques... Enfin, le succès ou l'échec d'initiatives menées à l'étranger sur les mêmes thématiques créeront des conditions favorables ou non au développement de ces technologies en France : le développement des marchés précoces et des applications mobiles est intimement lié, par exemple, à l'émergence de marchés internationaux.

Néanmoins, des verrous ou freins propres au développement de la filière nationale existent. Ils sont de natures diverses.

Verrous à caractère technico-économique

Des défis technico-économiques restent tout d'abord à relever : ceux-ci reposent essentiellement sur l'optimisation des briques technologiques actuelles, jusqu'à la mise à disposition de produits industrialisables à coûts maîtrisés. D'une manière générale, le déploiement de la filière n'est pas conditionné à l'émergence de ruptures technologiques.

Dans le domaine des piles à combustible, l'intégration des composants en systèmes, l'allongement de la durée de vie et l'amélioration de la fiabilité des piles, ainsi que la mise en œuvre industrielle de ces technologies à moindre coût sont les principaux verrous communs. Chaque technologie de piles nécessite par ailleurs de lever des verrous spécifiques, comme la diminution des quantités de métaux précieux mis en œuvre pour les piles basse température, la corrosion et la tenue en température pour les piles haute température, etc...

Dans le domaine de l'hydrogène énergie, la faisabilité du CSCV sera déterminante dans la mise en œuvre d'une filière de vaporeformage du gaz naturel faiblement émettrice de gaz à effet de serre. Les procédés d'électrolyse haute et basse température et les technologies de stockage d'hydrogène doivent par ailleurs être optimisées et leur fabrication industrialisée.

Verrous à caractère socio-économique

Les applications mettant en œuvre l'hydrogène énergie et les piles à combustible se trouvent aujourd'hui confrontées à l'absence de cadre réglementaire et normatif adapté, la réglementation actuelle ne reconnaissant que la production et le stockage industriel d'hydrogène. Une meilleure compréhension partagée des risques technologiques liés à l'ensemble des applications – production, stockage, transport de l'hydrogène ou applications des piles dans les usages – doit permettre de définir des règles adaptées qui assurent un haut niveau de sécurité tout en ne surestimant pas ces risques.

Des images ou représentations collectives peuvent également constituer un frein chez les décideurs et les utilisateurs potentiels de ces technologies. En France, la « peur de l'hydrogène » est souvent évoquée, traduisant des interrogations fortes sur les risques technologiques liés à son usage. Ces perceptions et ces attentes peuvent être pénalisantes si elles ne sont pas prises en compte.

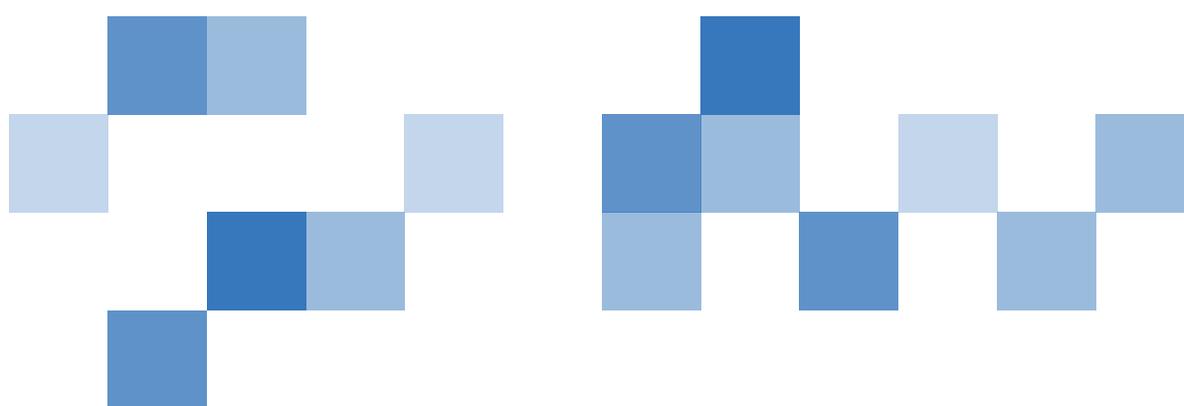
Verrous à caractère économique et industriel

La maturité économique de la filière ne pourra être atteinte qu'à moyen terme, car les applications ne deviendront que progressivement compétitives par rapport aux technologies de référence. Certains investissements nécessaires s'avèrent également relativement lourds, dans le domaine de la production d'hydrogène, ou des infrastructures de distribution et de stockage de l'hydrogène dans les milieux diffus par exemple. La filière repose enfin sur des acteurs économiques et industriels divers, aux compétences multiples, et dont aucun ne maîtrise la totalité de la chaîne technologique.

Le risque économique et industriel est donc élevé pour ces acteurs et peut conduire à un certain attentisme : la production d'hydrogène énergie est ainsi conditionnée au développement des applications des piles à combustible, qui lui-même dépend du développement d'infrastructures de distribution d'hydrogène... La gestion du risque dans ces phases de transition du déploiement de la filière est un élément clé de réussite.

Le tableau suivant précise, pour chacune des visions 2050, la nature des principaux verrous et leur importance relative :

	Verrous technico-économiques	Verrous socio-économiques	Verrous économiques et industriels
Vision 1	++ faisabilité du CSCV	+ aspects réglementaires uniquement	+ absence de contrainte carbone
Vision 2	++ coût de l'hydrogène renouvelable	+ producteurs locaux, réglementation	+++ approvisionnement industriel diffus sur le territoire
Vision 3	+++ faisabilité du CSCV, stockages massifs d'hydrogène	++ consommateurs usagers des piles, réglementation	+++ infrastructures de distribution, rentabilité à long terme
Vision 4	+++ coût de l'hydrogène renouvelable	+++ adhésion des décideurs locaux et des consommateurs, réglementation	++ infrastructures de type boucles locales



Feuille de route l'hydrogène énergie et les piles à combustible

Parmi les leviers qui permettront de lever ces verrous, trois paraissent déterminants.

Soutien et accompagnement politique

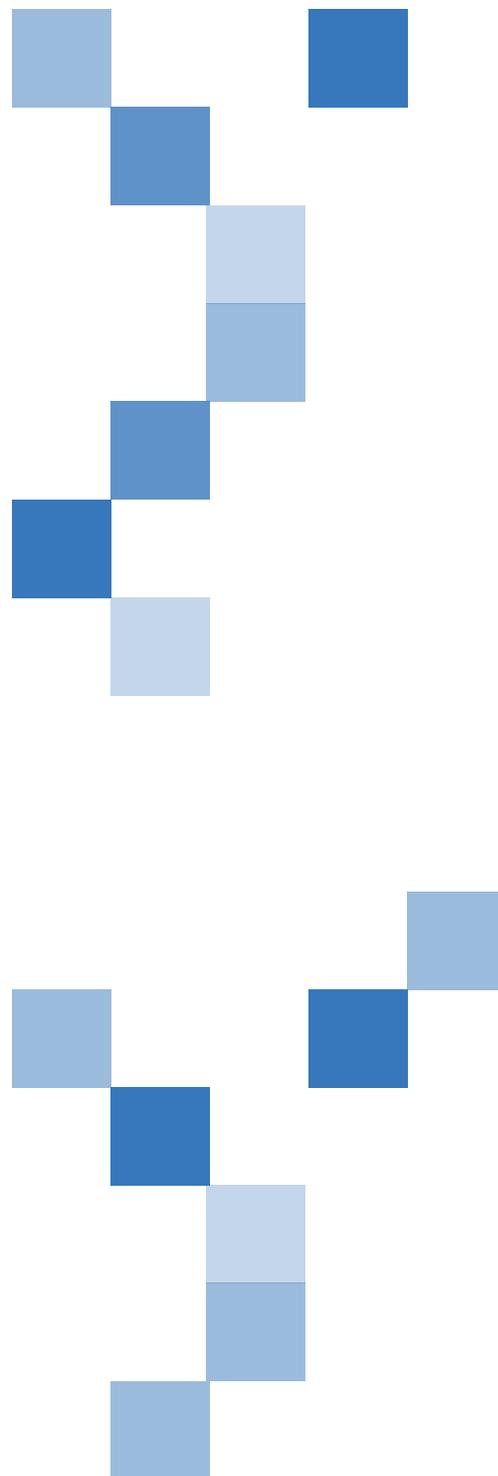
L'appui et le soutien des pouvoirs publics dans la durée sont nécessaires à plusieurs niveaux. La définition d'un cadre réglementaire et normatif adapté relève tout d'abord en partie de leur responsabilité. Les pouvoirs publics sont par ailleurs au cœur des décisions stratégiques qui orientent les évolutions du système énergétique national, incluant les réseaux : l'intégration de l'hydrogène énergie et des piles à combustible dans ce système suppose que ces technologies soient considérées dans ces décisions stratégiques. Enfin, l'accompagnement politique de la filière, par des mécanismes de soutien aux investissements, par une mise en visibilité des enjeux environnementaux liés à ces technologies, peut contribuer à réduire les risques économiques et industriels que devront supporter les acteurs.

Engagement de grands industriels français, associé à un tissu de PME

Compte tenu des applications stationnaires et mobiles visées, le déploiement de ces technologies n'est pas envisageable sans l'implication de grands opérateurs énergétiques, mais également d'industriels manufacturiers, comme les constructeurs automobiles. L'industrialisation des technologies et le déploiement d'infrastructures de distribution et de stockage nécessitent par ailleurs des investissements importants qui ne peuvent être engagés que par des groupes industriels. Leur engagement est cependant indissociable du développement d'un tissu de PME spécialisées, tant la filière nécessite la mise en œuvre de compétences complexes et variées.

Acceptabilité sociétale

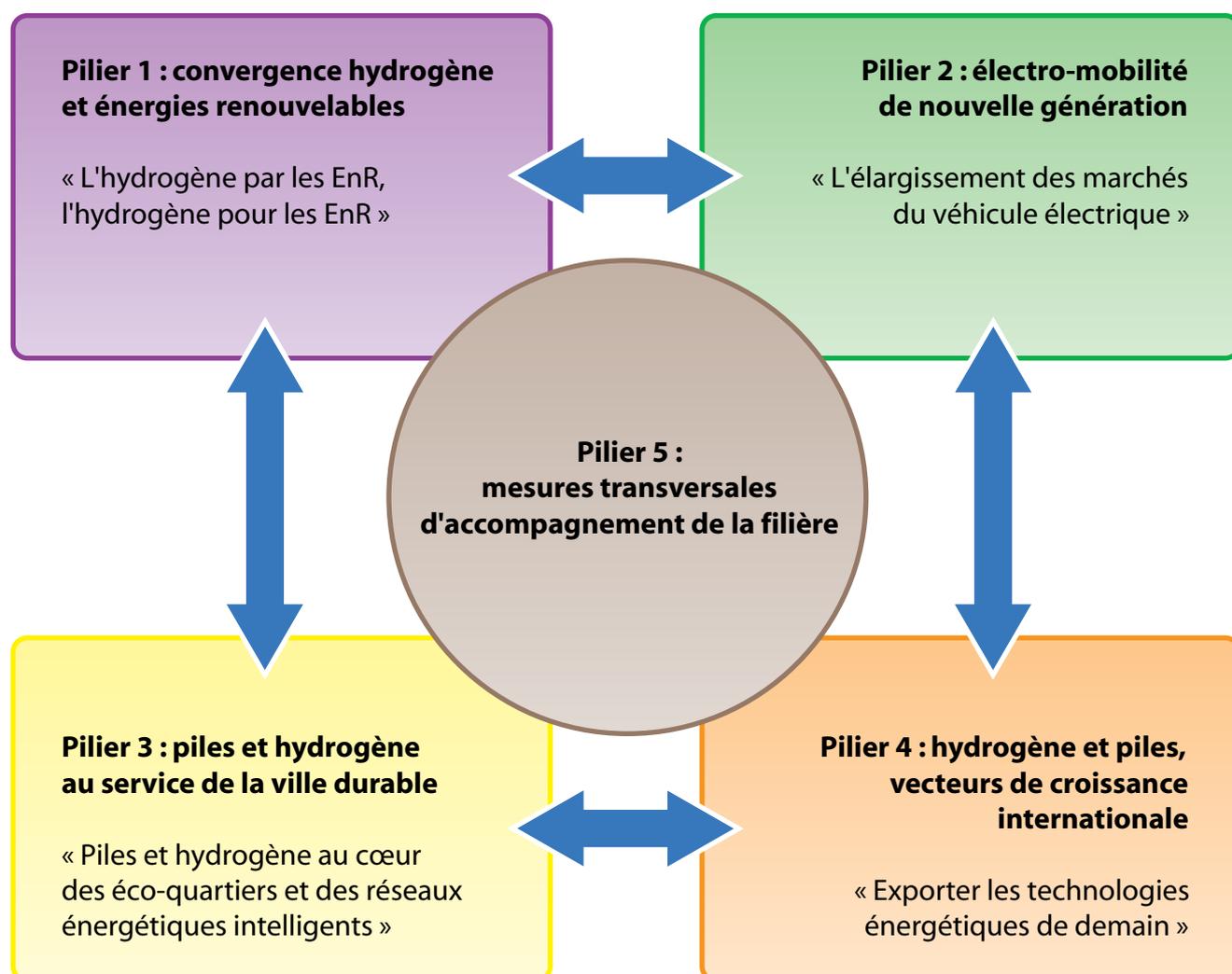
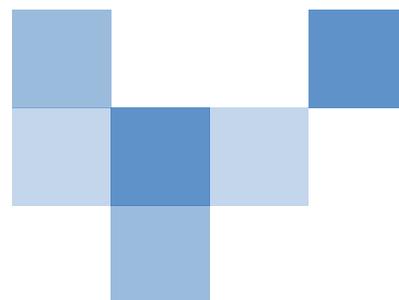
Les visions 2050 impliquent, pour celles qui s'appuient sur des usages diffus de l'hydrogène, une proximité des usagers et décideurs aux technologies hydrogène et piles : proximité par leur intégration banalisée dans les bâtiments, dans les transports ; proximité par leur lien avec les énergies renouvelables, par la présence d'infrastructures de stockage et de distribution disséminées sur le territoire. Ces technologies seront d'autant plus acceptées et souhaitées qu'elles répondront à des besoins ou des attentes sociétales : contribution aux défis environnementaux, accroissement du service rendu dans le domaine de l'électro-mobilité, sécurité d'approvisionnement électrique de sites... Le développement des technologies hydrogène énergie et des piles à combustible, au regard des services qu'elles peuvent apporter aux usagers et décideurs, est une des clés de leur déploiement.



> 6. Visions 2020

Le Grenelle de l'environnement a fixé des objectifs à atteindre en 2020 dans l'ensemble des domaines d'activité au plan national. C'est en effet à cette échéance que certaines inflexions technologiques, organisationnelles ou socio-économiques doivent être observées pour permettre d'atteindre le facteur 4 à l'horizon 2050.

Dans le domaine de l'hydrogène énergie et des piles à combustible, les experts ont identifié quatre axes stratégiques de développement à moyen terme, schématisés ci-dessous : ces axes, ou piliers, correspondent aux applications clés dont la faisabilité devra avoir été démontrée en 2020 en vue de conserver toutes les potentialités de la filière pour 2050. Ce sont les points de passage ou les avancées technologiques nécessaires à la réalisation des visions 2050 exposées précédemment. Un cinquième pilier stratégique, transversal et en appui des quatre autres, vient compléter cette vision 2020.



Feuille de route l'hydrogène énergie et les piles à combustible

Pilier 1 : convergence hydrogène/énergies renouvelables

Le déploiement des applications hydrogène en synergie avec les énergies renouvelables constitue le premier axe stratégique. Il s'agit de confirmer, d'une part, la faisabilité technique et économique de la production et du stockage décentralisés d'hydrogène à partir des différentes sources d'énergie renouvelables, quel que soit l'usage aval de l'hydrogène. Et d'autre part, de confirmer l'intérêt d'une valorisation des énergies renouvelables sous forme d'hydrogène et les bénéfices apportés par ce vecteur en termes de modularité et de flexibilité : valorisation d'électricité renouvelable fatale¹¹ non injectable sur le réseau, stockage local d'énergie au niveau d'un bâtiment ou d'un îlot, gestion des intermittences d'un réseau électrique isolé...

A l'horizon 2020, une capacité de production d'hydrogène renouvelable de 100 MW (soit 3 tonnes d'hydrogène par heure) peut être retenue comme objectif atteignable, avec une valorisation avale énergétique ou industrielle. L'hydrogène et les piles à combustible pourraient par ailleurs représenter 5 à 15 % du marché des nouveaux besoins de stockage d'énergie incluant une réinjection sur les réseaux d'électricité et/ou de gaz naturel.

Pilier 2 : électro-mobilité de nouvelle génération

Les applications de l'hydrogène et des piles dans le domaine de la mobilité, et tout particulièrement la démonstration de leur complémentarité avec les véhicules électriques particuliers, constituent le deuxième enjeu majeur à l'horizon 2020. Leur intégration aux véhicules à batterie permettra en effet d'allonger l'autonomie de ces véhicules et de diminuer le temps de recharge, donnant naissance à une nouvelle génération d'électro-mobilité. Les applications de l'hydrogène dans ce domaine se traduiront nécessairement par une hybridation pile/batterie, envisageable à différentes échelles, des véhicules mus quasiment exclusivement par pile à combustible aux véhicules électriques équipés d'une pile auxiliaire (notion de *range extender*).

Les premières applications pourraient concerner les flottes captives, car pouvant être alimentés par des infrastructures dédiées. Les industriels estiment ainsi qu'il est envisageable de lever, d'ici à 2020, une partie des verrous technico-économiques permettant un déploiement précommercial des véhicules équipés de piles pour les particuliers. Ce déploiement suppose, à cette échéance, l'existence sur le territoire d'une infrastructure minimum de remplissage d'hydrogène.

11 - Quantité d'énergie inéluctablement présente ou piégée dans certains processus ou produits, qui parfois, au moins pour partie, peut être récupérée et/ou valorisée.

Pilier 3 : piles et hydrogène au service de la ville durable

Les potentialités énergétiques et environnementales de la pile à combustible permettent d'entrevoir des applications stationnaires variées au service de la ville durable, des bâtiments et îlots à énergie positive et des réseaux. L'utilisation des piles en association avec une production et un stockage décentralisés d'hydrogène permettra en effet d'optimiser les flux énergétiques à un niveau local : cogénération, gestion de l'offre et de la demande énergétique locale par le stockage, valorisation des énergies renouvelables disponibles, interconnexion entre réseaux intelligents électrique et gazier... La valorisation d'hydrogène combiné au gaz naturel sous forme de mélange type Hythane[®] pour des usages locaux s'inscrit dans cette vision territoriale.

Le déploiement sur le marché de masse des systèmes de moyenne cogénération semble accessible à l'horizon 2020 ; la micro-cogénération atteignant à cette date sa phase de maturité avec 5 000 à 10 000 systèmes installés. Selon les industriels, l'hydrogène et les piles concerneraient ainsi 10 à 20 % du marché des bâtiments et îlots autonomes énergétiquement. Ces déploiements pourraient s'articuler autour de 10 à 20 villes ou éco-quartiers approvisionnés via des réseaux locaux de distribution d'hydrogène ou de gaz naturel.

Pilier 4 : hydrogène et piles, vecteurs de croissance internationale

Les marchés à plus forts potentiels pour la filière hydrogène et piles à combustible se situent, dans un premier temps, à l'international et plus particulièrement dans les économies émergentes ou en transition, dans lesquelles les réseaux électriques peuvent être défaillants et où le marché automobile est en pleine expansion. La conquête des marchés internationaux constitue le quatrième axe stratégique pour le développement de la filière française : les acteurs français ont en effet la capacité de se positionner sur plusieurs maillons à forte valeur ajoutée de la chaîne de valeur, comme le stockage haute pression, l'électrolyse basse température, l'intégration des systèmes et plus généralement sur l'ensemble des applications précoces.

A l'horizon 2020, l'export pourrait représenter 50 % du chiffre d'affaires des acteurs français de la filière hydrogène et piles à combustible, positionnant celle-ci comme un vecteur de croissance nationale.

Pilier 5 : mesures transversales d'accompagnement de la filière

La poursuite des quatre axes stratégiques précédents n'est envisageable que si des mesures d'accompagnement de la filière sont parallèlement mises en œuvre. Ces mesures ont pour objectif de lever certains verrous socio-économiques précédemment cités : définition d'un cadre réglementaire et normatif adapté, politiques de soutien par des mécanismes économiques et/ou fiscaux, programmes de sensibilisation, de communication, de formation.

> 7. Priorités de recherche, besoins de démonstrateurs

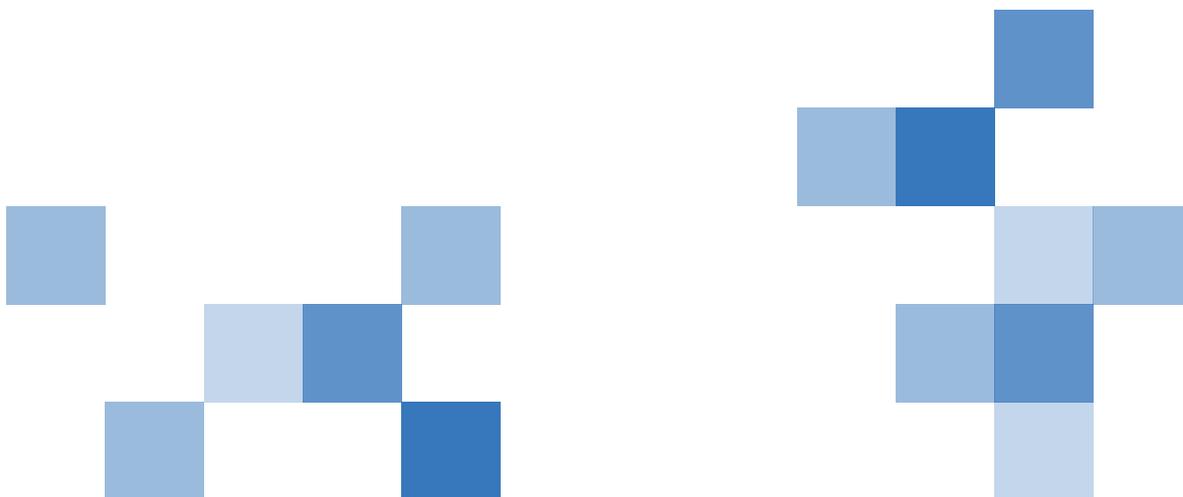
La vision 2020 permet de dégager des priorités en termes de travaux de recherche et d'identifier les besoins de démonstrateurs de recherche ou préindustriels qui apparaissent les plus stratégiques. Elles doivent guider les actions à engager à court et moyen terme.

Pilier 1 : convergence hydrogène/énergies renouvelables

Priorités de recherche	
1.1	R&D sur la production d'hydrogène : aucune voie n'apparaissant à privilégier ou à exclure, les travaux de recherche doivent concerner l'ensemble des procédés (électrolyse basse température, électrolyse haute température, biomasse).
1.2	Etudes technico-économiques des systèmes : il s'agit de valider l'intérêt technico-économique de la production et de la valorisation de l'hydrogène produit à partir de sources renouvelables. Ces travaux devront porter sur le développement de modèles et scénarios économiques, sur l'identification de mécanismes économiques et financiers de soutien, nécessaires à la filière.
1.3	Etudes technico-économiques pour la faisabilité de smart energy grid : les potentialités offertes par l'hydrogène et les piles dans l'optimisation des réseaux énergétiques sont à confirmer. Ces travaux devront spécifier les enjeux et les verrous restant à lever.
Actions de démonstration	
1.4	Projets de démonstration de valorisation d'énergies renouvelables via le vecteur hydrogène : la valorisation de l'hydrogène pourra être énergétique (flottes captives de véhicules, production d'électricité et chaleur, etc.) ou industrielle (raffinerie, sidérurgie, biocarburants de seconde génération...) en substitution de sources non renouvelables.
1.5	Projets de démonstration de valorisation d'hydrogène fatal : la valorisation de 1 000 tonnes d'hydrogène fatal sur un site industriel avec valorisation dans des applications hydrogène énergie.

Pilier 2 : électro-mobilité de nouvelle génération

Priorités de recherche	
2.1	R&D sur les PEMFC, les systèmes et le stockage embarqué : les travaux chercheront à optimiser les coûts au regard des performances en termes de durabilité pour les piles, et selon les matériaux choisis pour les systèmes de stockage d'hydrogène.
2.2	Etude technico-économique pour le déploiement d'une infrastructure hydrogène pour l'automobile sur le territoire national : il s'agit d'explorer la problématique du modèle économique et d'identifier l'approche la plus pertinente pour le déploiement d'une infrastructure à grande échelle sur le territoire en utilisant les ressources et infrastructures disponibles.
Actions de démonstration	
2.3	Projets de démonstration de véhicules piles à combustible sur des flottes captives/tests dans 2 à 5 villes : les flottes captives constituent des cibles prioritaires en vue d'une validation industrielle à l'échelle de cinq ans, tout en minimisant les coûts d'infrastructure d'approvisionnement. Aucune architecture ou degré d'hybridation pile/batterie n'est a priori privilégiée.
2.4	Projets de démonstration de véhicules piles à combustible sur des flottes captives : il s'agit de déployer des véhicules dans des flottes plus importantes (loueurs, grands groupes et sociétés de service), préparant le déploiement commercial.
2.5	Projets de démonstration « bateau du futur » : l'intégration des systèmes piles dans des navires fluviaux ou maritimes, en traction ou comme système auxiliaire, pourra également être démontrée.



Pilier 3 : piles et hydrogène au service de la ville durable

Priorités de recherche	
3.1	R&D en matière de micro-cogénération et moyenne cogénération SOFC : les actions de recherche devront permettre de réduire les coûts de fabrication, tout en assurant une durabilité et une fiabilité optimum des systèmes.
Actions de démonstration	
3.2	Tests coordonnés de systèmes stationnaires de micro-cogénération domestique et de moyenne cogénération : des essais multisites d'une dizaine de démonstrateurs de type piles permettront de valider l'intégration de ces systèmes en fonction des profils d'usages et des conditions d'implantation liés aux bâtiments résidentiels, tertiaires ou industriels.
3.3	Tests coordonnés de systèmes de stockage et de génération dans les bâtiments : de la même manière, des essais multisites porteront sur les systèmes piles associés à une production décentralisée et à un stockage d'hydrogène intégré aux bâtiments.
3.4	Projet de démonstration pour l'injection d'hydrogène bas carbone dans les canalisations de gaz naturel : il s'agit de valider la faisabilité technico-économique sur l'ensemble de la chaîne – compression, stockage tampon, transport, distribution – en faisant évoluer le cadre réglementaire et normatif.
3.5	Projets de démonstration fédérateurs de chaînes complètes hydrogène renouvelable dans des boucles locales : 10 à 15 expériences reposant sur une production, une distribution et une utilisation locale d'hydrogène renouvelable pour différents usages (flottes captives, transports urbains, micro et moyenne cogénération) permettront de démontrer à différentes échelles du territoire la diversité des applications et la flexibilité des technologies hydrogène et piles.
3.6	Projet de démonstration de smart energy grid à l'échelle d'une ville ou d'un éco-quartier : en amont des usages énergétiques finaux, les potentialités offertes par l'hydrogène dans l'optimisation de la gestion des réseaux électriques et gaz pourront être démontrées dans le cadre de projets spécifiques.
3.7	Déploiement de flottes de véhicules type Hythane® : la valorisation de mélange gaz naturel/hydrogène dans des flottes captives de type bus ou bennes à ordures ménagères apparaît stratégique pour la filière et son adhésion par les décideurs locaux et les usagers.

Pilier 4 : hydrogène et piles, vecteurs de croissance internationale

Actions de démonstration	
4.1	Démonstration de flottes de véhicules spéciaux hors route (groupes auxiliaires, engins logistiques, engins de manutention) : il s'agit d'équiper 3 à 4 plates-formes logistiques (sites aéroportuaires ou maritimes, etc.) de technologies piles démontrant leur intérêt spécifique, leur intégration logistique à ce type de plate-forme et faisant évoluer le cadre réglementaire et normatif en prévision d'un déploiement.
4.2	Projets de démonstration pour des applications secours et fourniture de courant pour sites isolés : de la même manière, ces projets permettront de finaliser la mise en œuvre des technologies piles selon ces usages stratégiques en prévision d'un déploiement ultérieur, sur le plan national ou international.

Pilier 5 : mesures transversales d'accompagnement de la filière

L'accompagnement du développement de la filière ne fait l'objet ni de priorités de recherche ni de besoins de démonstrateurs. Les experts souhaitent néanmoins préciser quelles pourraient être ces mesures, qui conditionnent par ailleurs la réussite in fine des actions de recherche et de démonstrations.

Mécanismes de soutien public	
5.1	Commandes publiques d'équipements : le déploiement de certaines applications pourrait être soutenu par ce biais, parmi lesquelles : les véhicules équipés de piles pour les flottes captives, en lien avec le plan national de soutien des véhicules électriques et hybrides rechargeables ; les véhicules type Hythane® avec infrastructures d'approvisionnement ; les groupes de secours et d'alimentation de sites isolés (hôpitaux, relais de télécommunication).
5.2	Mise en place des outils de gestion du risque industriel : ce type d'outils devra être élaboré en concertation avec l'ensemble des parties prenantes, et notamment des acteurs des secteurs banque et assurance.
5.3	Soutien financier et mesures incitatives : les mécanismes classiques potentiellement mobilisables sont diverses : subvention aux investissements de piles adossée à la puissance installée, participation aux investissements d'infrastructure de stockage et de distribution d'hydrogène, tarif d'achat pour l'électricité produite, exonération fiscale, mécanismes réglementaires du type « certificat vert » appliqué à la distribution d'hydrogène, obligation de renouvellement des groupes de secours...
Mesures spécifiques	
5.4	Structure de coordination et d'animation : une telle structure collective permettrait de représenter les acteurs auprès des pouvoirs publics et de mener des actions opérationnelles stratégiques pour la filière, dans les domaines normatif et réglementation notamment.
5.5	Evaluation des besoins futurs de formation : le déploiement des applications liées à l'hydrogène et aux piles nécessitera de former des agents (techniciens, ingénieurs) dans de nombreux domaines. Il conviendra d'évaluer ces besoins et d'identifier les approches de formation les plus pertinentes à mettre en place.
5.6	Communication et sensibilisation : l'adhésion sociétale des décideurs et citoyens passe par des programmes de communication et de sensibilisation du public. Ces programmes permettront à la fois de faire connaître les applications et les enjeux liés à l'hydrogène et aux piles et de mieux appréhender les attentes du public.

Contribution des axes stratégiques aux enjeux

La poursuite des travaux de recherche identifiés et la réalisation des actions de démonstration permettront de valoriser l'ensemble des potentialités offertes par l'hydrogène énergie et les piles à combustible. Le tableau de synthèse ci-dessous précise la contribution de chaque pilier aux enjeux énergétiques et environnementaux identifiés précédemment.

ENJEUX	Pilier 1	Pilier 2	Pilier 3	Pilier 4
Indépendance énergétique et préservation des ressources	Production d'hydrogène renouvelable	Applications hydrogène renouvelable	Applications hydrogène renouvelable	
Réduction des émissions de CO ₂ diffuses	Production d'hydrogène renouvelable	Applications hydrogène bas carbone	Applications hydrogène bas carbone	
Evolution des réseaux énergétiques	Gestion des intermittences et stockage, effacement de la demande		Interconnexions entre réseaux énergétiques locaux	Secours, renforcement des réseaux isolés
Réduction des nuisances en milieu urbain		Mobilité aux impacts réduits		
Amélioration de l'efficacité énergétique dans les bâtiments			Production d'électricité et de chaleur à haut rendement	

> 8. ANNEXE

Programmes étrangers en faveur du développement de l'hydrogène et des piles à combustible

1 - Allemagne

Le *National Innovation Program (NIP)* est un programme de développement de l'hydrogène et des piles à combustible associant industriels et scientifiques allemands, initié en 2007 avec l'appui du gouvernement. Il mobilise un budget de 1,4 milliard d'euros sur dix ans, composé pour moitié de budgets fédéraux et pour moitié de contributions d'industriels de la filière. Le programme est articulé autour de deux plans de développement dans le domaine des transports et des applications stationnaires. Les fonds sont répartis à 30 % pour des projets de R&D et à 70 % pour des projets de démonstration et de préparation au développement du marché.

Le programme est piloté par une structure dédiée indépendante : NOW, *National Organisation Wasserstoff-und Brennstoffzellentechnologie*. Un système de gouvernance spécifique permet de faire converger les objectifs politiques, industriels et scientifiques, facilitant à terme l'éclosion d'une politique industrielle en matière d'hydrogène. Quatre ministères du gouvernement fédéral allemand sont impliqués : les Transports, l'économie et la technologie, l'éducation, et l'environnement.

Transport : le Plan H2Mobility

Dans le domaine des transports, l'Allemagne développe le concept d'électro-mobilité, qui associe dans le même temps développement des véhicules à batteries et celui des véhicules à piles à combustible. Plus spécifiquement, un protocole d'accord, H2Mobility, a été signé en septembre 2009 par les sociétés Linde, Air Liquide, Air Product, Daimler, EnBW, NOW, OMV, Shell, Total et Vattenfall, ayant pour objectif de déployer une infrastructure hydrogène pour une production en série de véhicules à hydrogène dès 2015.

L'accord prévoit l'élaboration et la validation d'un modèle économique d'ici à 2015 au cours d'une première phase non engageante pour les partenaires. Si les résultats sont concluants, les constructeurs automobiles (parmi lesquels Daimler, Ford, GM, Honda, Hyundai, Nissan et Toyota) s'engagent à produire plusieurs centaines de milliers de véhicules à hydrogène pour 2015, pendant que les compagnies énergétiques et les gaziers mettront en place l'infrastructure nécessaire pour l'approvisionnement des véhicules en hydrogène. L'année 2015 représentera donc vraisemblablement un point de renforcement ou de basculement dans la stratégie allemande en matière d'électro-mobilité.

Applications stationnaires : Programme Callux

Le programme allemand Callux vise à faciliter le déploiement de systèmes de micro-cogénération domestique. Partie intégrante du NIP, il vise dans une première phase à installer plusieurs centaines de systèmes de micro-cogénération domestique qui fonctionneront pendant une durée de huit ans. L'objectif de cette première phase, qui court jusqu'en 2012, est de démontrer la viabilité technico-économique de cette solution, afin de permettre un déploiement massif à l'horizon 2015. Le coût total du projet est de 84 millions d'euros, financés à hauteur de 40 millions d'euros par le ministère des Transports et des Bâtiments. Ce budget permet de soutenir 50 % de l'investissement réalisé pour l'acquisition de l'équipement. Une des forces du programme est de permettre la mobilisation de tous les acteurs intéressés par ce marché autour d'objectifs précis : développeurs de systèmes de chauffage et intégrateurs de piles à combustible (Vaillant, Viessmann, Baxi Innotech, Hexis), énergéticiens majeurs (EnBW, E.ON, EWE, MVV, VNG) et communauté scientifique (*Center for Solar Energy and Hydrogen Research* à Stuttgart).

2 - Etats-Unis

Après avoir exercé un leadership politique important au début des années 2000 durant l'administration Bush, l'administration fédérale américaine semble à présent beaucoup plus prudente quant aux débouchés industriels de l'hydrogène dans le domaine des transports. Dans ce secteur, la priorité semble être désormais donnée aux véhicules électriques à batterie rechargeable et aux biocarburants de deuxième et troisième génération. Certains grands groupes, comme General Motors, poursuivent néanmoins leurs développements en matière de R&D dans le secteur des transports.

Le développement des applications nomades et stationnaires à court et moyen terme semble mieux engagé, développement soutenu par le Département de l'énergie (DoE) à travers son *US National Hydrogen & Fuel Cell Program*. Certains spécialistes, comme Fuel Cell Energy, Plug Power, UTC ou des gaziers comme Air Products, semblent affermir leurs positions sur des marchés précoces telle la petite et moyenne cogénération, le courant de secours (profitant de certaines faiblesses structurelles du réseau électrique, du contenu carbone parfois très élevé de l'électricité dans certains états américains et des subsides mis à disposition) et les engins de manutention. En outre, le Département de la défense (DoD) demeure un donneur d'ordres et un acheteur régulier d'équipements, permettant ainsi de financer de manière directe ou indirecte un certain nombre de coûts de développement des équipementiers de la filière. L'*American Recovery and Reinvestment Package* voté en 2009 prévoit des mécanismes de subsides dont peuvent largement bénéficier les développeurs de piles à combustible : 30 % de crédit d'investissement pour de nouvelles installations, subsides spécifiques pour l'installation de nouvelles technologies permettant d'accroître l'efficacité énergétique dans les bâtiments gouvernementaux ou les bâtiments résidentiels.

En parallèle des soutiens au niveau fédéral, les industriels peuvent compter sur un certain nombre d'initiatives notables qui viennent stimuler ou soutenir la demande au niveau local, comme par exemple :

- Le *California Self Generation Initiative*, qui permet de subventionner des installations allant jusqu'à 5 MW, utilisant différents types de combustibles renouvelables ou du gaz naturel.
- Le *Palm Desert Energy Independence Act* qui se concentre sur le secteur résidentiel et la reconstruction, avec pour objectif de réduire de 30 % la consommation d'électricité et de gaz, offrant ainsi une variété d'opportunités aux résidents de Palm Desert, notamment pour des piles fonctionnant au gaz naturel ou alimentées par de l'hydrogène produit par électrolyse à partir de solaire photovoltaïque.

A noter enfin, l'existence d'une centaine de stations-service hydrogène dans tout le pays, dont une soixantaine en fonctionnement (et une trentaine pour la seule Californie, dont vingt sur l'*Hydrogen Highway*).

3 – Japon

La stratégie japonaise est axée sur l'identification de synergies transversales avec d'autres priorités politiques (en matière de transport, énergie et environnement), ainsi que des synergies verticales dans les conglomérats nationaux (par exemple, Kyocera, Panasonic, Nippon Oil, Toshiba ou Toyota).

Selon l'*Industry Review 2010* de FuelCellToday, l'Asie – et pour une grande partie le Japon – a représenté plus de 50 % des systèmes à piles à combustible installés dans le monde ces trois dernières années, principalement à travers les applications nomades et les applications stationnaires. Le segment stationnaire résidentiel fut soutenu par le *Japanese Large Scale Fuel Cell Demonstration Program*. Lancé en 2009, le programme Ene Farm, regroupant Tokyo Gas, Osaka Gas, Nippon Oil, Toho Gas, Saibu Gas Co et Mitsubishi Corporation, ambitionnait de commercialiser 5 000 systèmes de micro-cogénération résidentielle et ce dès la première année. Cet objectif a été atteint grâce notamment à des aides adressées par le gouvernement de 1,4 million de yens (soit 12 500 €), couvrant 50 % des coûts d'investissement. Le système mis en place par le gouvernement depuis 2005 prévoit une diminution progressive des subventions publiques en fonction des volumes de vente et ambitionne donc de faciliter l'introduction sur le marché.

Dans le secteur automobile le groupe Toyota demeure un leader incontesté sur le plan international en matière de développement du véhicule à pile combustible.

4 – Soutien de la Commission européenne

L'hydrogène et les piles à combustible bénéficient de soutien de la Commission européenne à travers son septième Programme cadre européen pour la recherche et le développement (PCRD 7) et le Plan stratégique pour les technologies énergétiques (SET PLAN). Ce soutien se traduit plus particulièrement par un partenariat public-privé, initié en 2008 et dénommé Initiative technologique conjointe pour les piles à combustible et hydrogène (*Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking*, FCHJU), entre la Commission européenne, le monde de l'industrie et celui de la recherche.

L'objectif de ce partenariat est de mettre en œuvre un programme d'activités de recherche, de développements technologiques et de démonstration (RDT&D) afin d'accélérer le développement et la commercialisation des technologies de l'hydrogène et des piles à combustible. A ce titre, le FCHJU bénéficie d'un budget de 470 millions d'euros provenant du septième PCRD, pour la période 2007-2013, auquel vient s'ajouter un investissement au moins équivalent de l'industrie. Un plan pluriannuel fixant les priorités stratégiques en matière de RDT&D a été conjointement développé par la Commission européenne, les Directions générales de l'industrie et de la recherche. Ce plan, qui influence nettement les priorités des industriels et les politiques européennes, est décliné chaque année en programme de travail. Ainsi pour 2010, un budget total de 89,1 millions d'euros est dédié aux activités de RDT&D par la Commission européenne, complété par la contribution de la Direction générale de l'industrie.

Le FCHJU bénéficie par ailleurs du soutien des Etats membres et des pays associés au 7e PCRD, regroupés au sein d'un organisme consultatif : le Groupe des représentants des Etats pour les piles à combustible et l'hydrogène (*Fuel Cell and Hydrogen States Representatives Group*). Ce groupe agit en tant qu'interface entre le FCHJU et les Etats membres.

Le Partenariat européen des régions et localités pour l'hydrogène et les piles à combustible (HyRaMP) a été créé en 2008, regroupant plus d'une trentaine de régions européennes ayant un intérêt ou des activités en matière d'hydrogène et de piles à combustible. Le rôle d'HyRaMP est de représenter les intérêts des régions face au FCHJU et aux autres acteurs européens de la filière. Le partenariat s'est ainsi fixé comme objectif d'agir en faveur de l'harmonisation des activités et financements régionaux à travers l'Europe, et du développement de projets communs, notamment en faveur du déploiement d'une infrastructure de l'hydrogène. Certaines régions françaises sont parties prenantes de ce partenariat : Midi-Pyrénées, Pays de la Loire, Rhône-Alpes.

L'ADEME en bref

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la triple tutelle du ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et du ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable.

Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle 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, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

www.ademe.fr



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr