

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 Frédéric SOLBES	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 AFNOR
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.

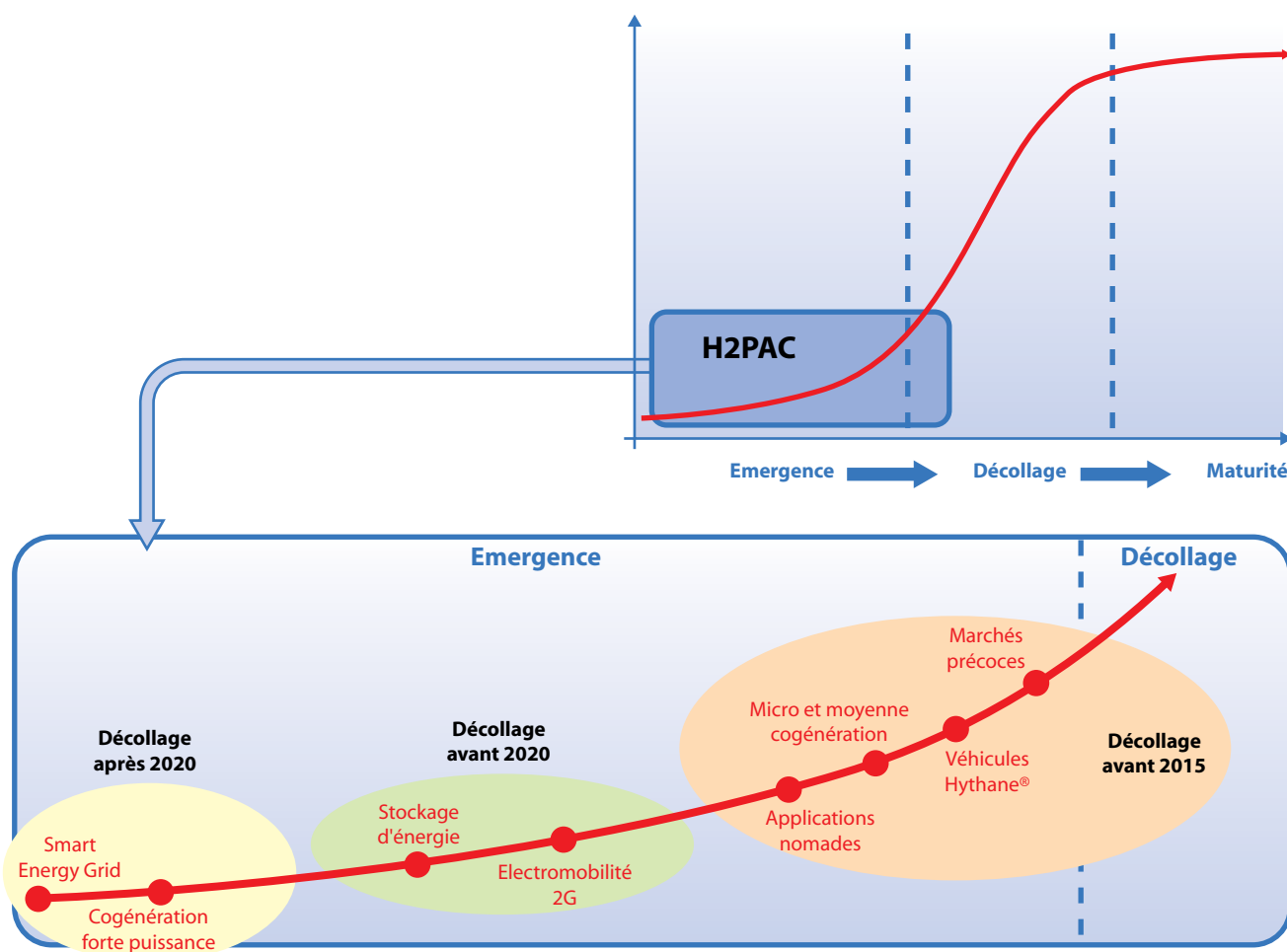
Applications de niche ou marchés précoces

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.

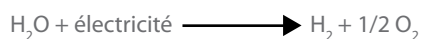


Feuille de route l'hydrogène énergie et les piles à combustible

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.

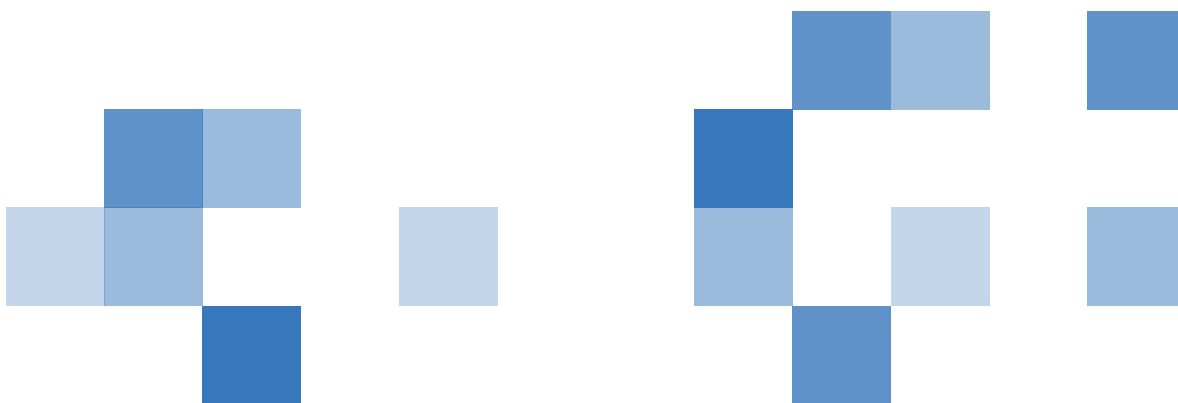
Aujourd'hui, l'hydrogène est également coproduit dans certains procédés chimiques (production de chlore, cokerie, pétrochimie, etc...). Cet hydrogène est soit valorisé dans un procédé, soit brûlé, soit rejeté.

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.

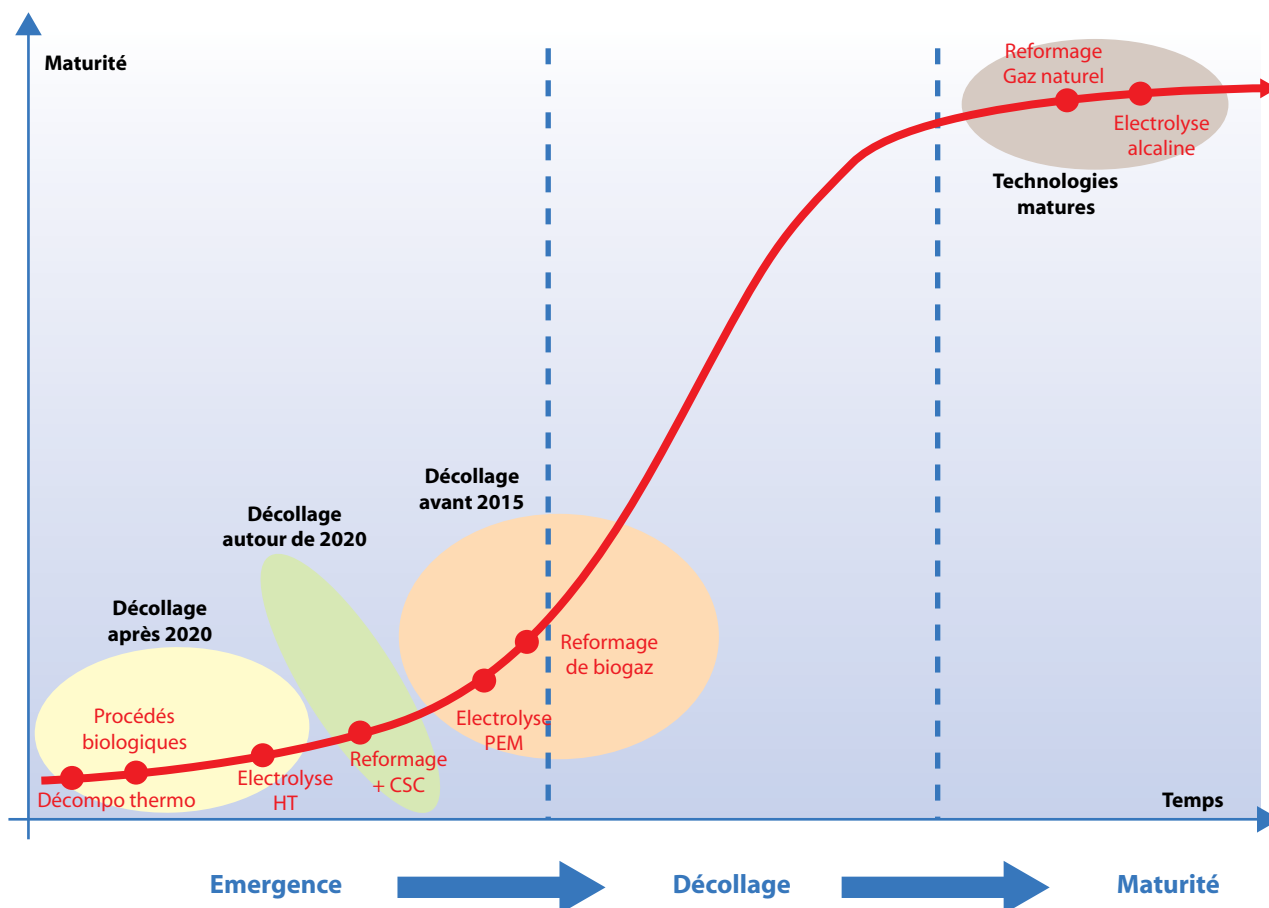


Figure 2 : Degré de maturité des technologies de production d'hydrogène et perspectives de développement (source : groupe d'experts)

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 :

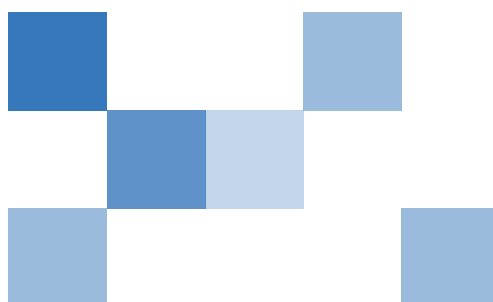
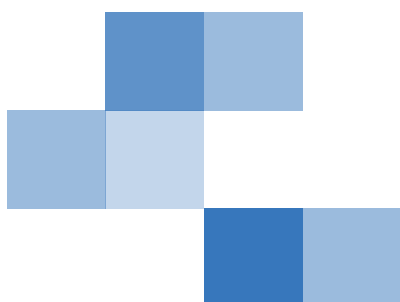
- l'état de l'art international et les initiatives étrangères en termes de priorités de recherche et de soutien au développement technologique, tels les programmes H₂ Mobility et Callux en Allemagne, le *Japanese Large Scale Fuel Cell Demonstration Programme* ou le *US National Hydrogen & Fuel Cell Program*, 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.

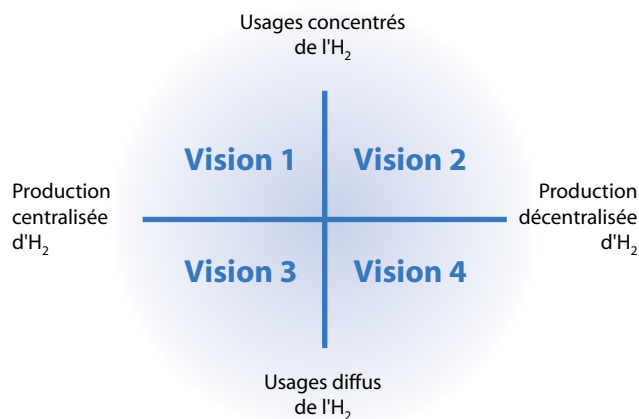


Figure 3 : Positionnement des visions 2050 selon les paramètres clés

> 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 thermochimique 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).

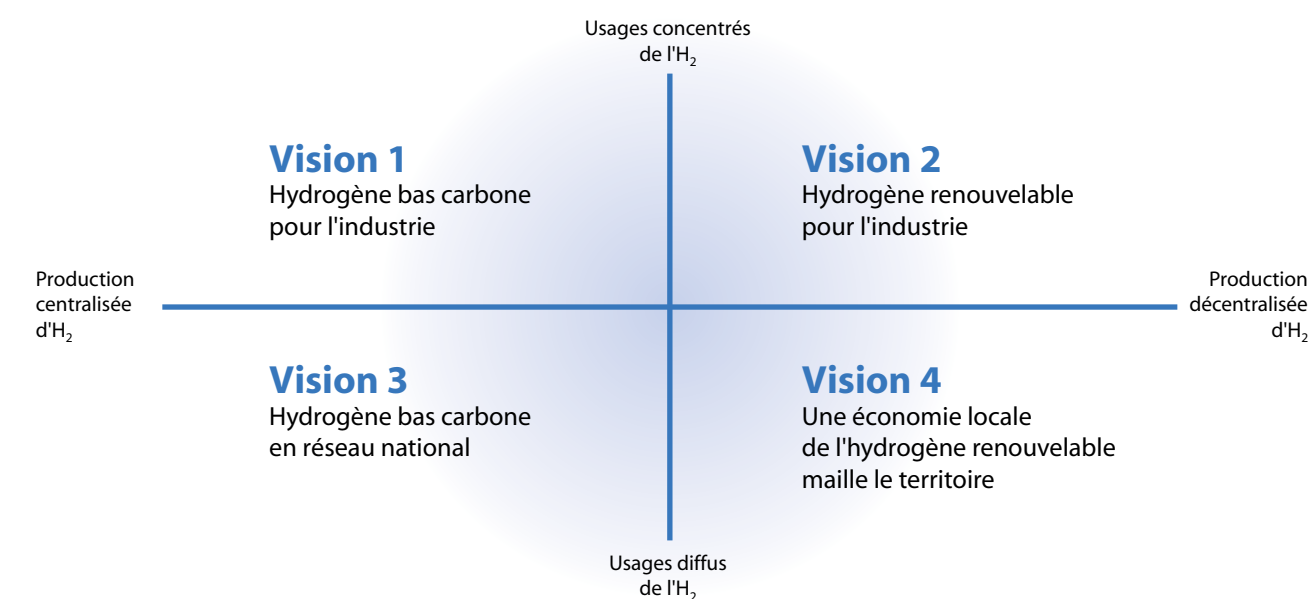


Figure 4 : Quatre visions en 2050

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.

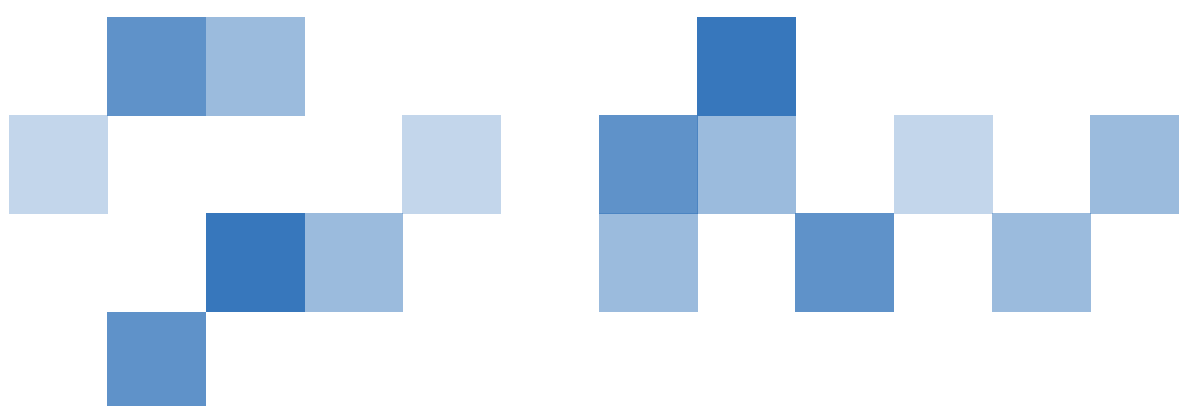
Verrous à caractère économique et industriel

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

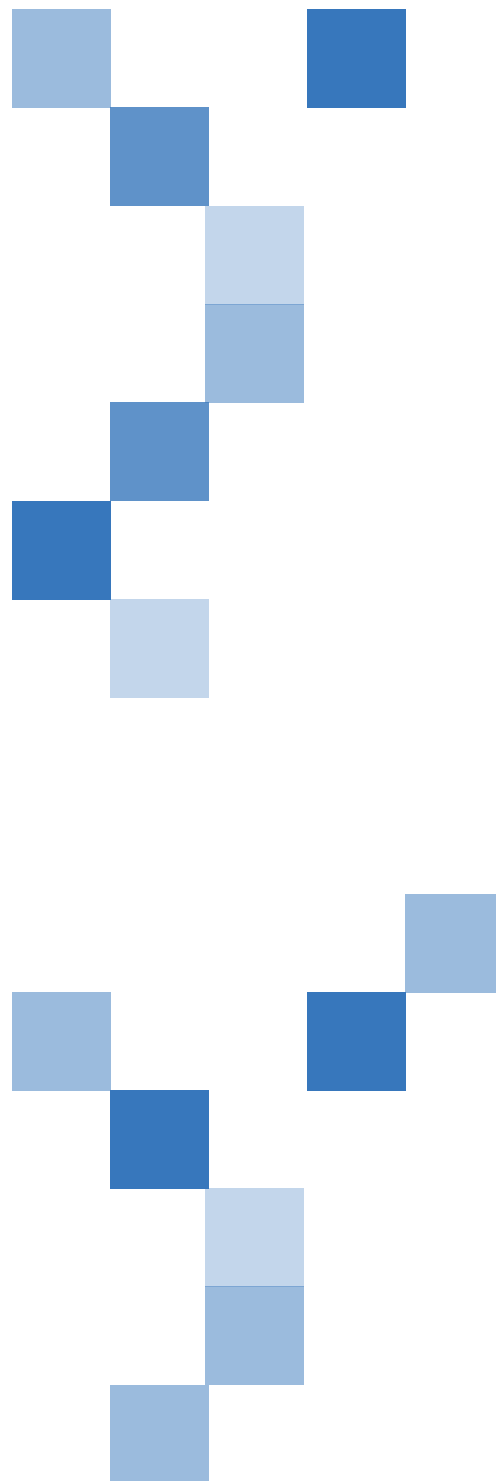
L'appui et le soutien des pouvoirs publics dans la durée sont nécessaires à plusieurs niveaux. La définition d'un cadre réglementaire et normatif adapté relève tout d'abord en partie de leur responsabilité. Les pouvoirs publics sont par ailleurs au cœur des décisions stratégiques qui orientent les évolutions 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

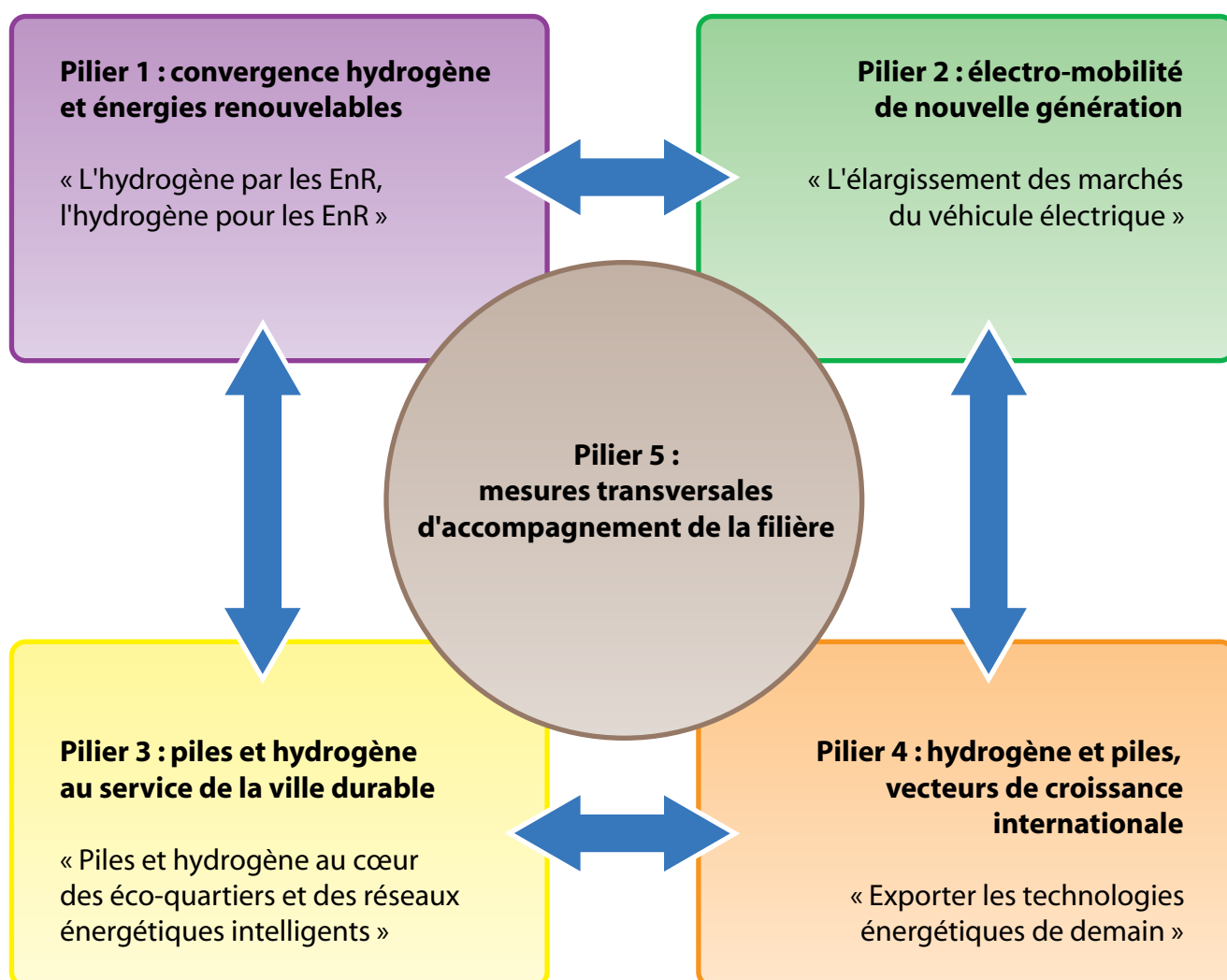
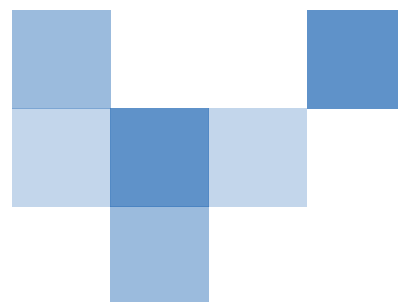
Les visions 2050 impliquent, pour celles qui s'appuient sur des usages diffus de l'hydrogène, une proximité des usagers et décideurs aux technologies hydrogène et piles : proximité par leur intégration banalisée dans les bâtiments, dans les transports ; proximité par leur lien avec les énergies renouvelables, 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

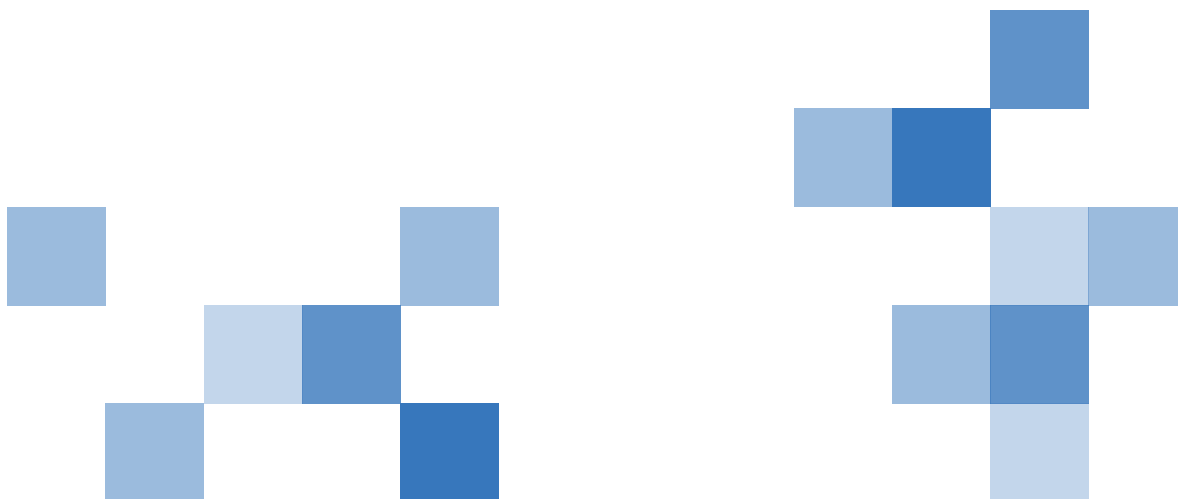
La vision 2020 permet de dégager des priorités en termes de travaux de recherche et d'identifier les besoins de démonstrateurs de recherche ou préindustriels qui apparaissent les plus stratégiques. Elles doivent guider les actions à engager à court et moyen terme.

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

Hydrogen energy and fuel cells



STRATEGIC ROADMAP

Table of contents

Preamble	4
1 Subject area of this roadmap.....	6
2 Challenges.....	11
3 Key parameters	12
4 The 2050 visions	14
5 Obstacles and levers.....	19
6 2020 Visions.....	21
7 Research priorities, demonstrator needs.....	24
8 Appendix.....	28

Preamble

Since 2010, the ADEME has been managing four programmes within the scope of “Future Investments”¹. Groups of experts from research from various industrial fields, research organisations and research programming and financing agencies are responsible, within the scope of collective works, for producing strategic roadmaps.

These are used to launch Calls for Expressions of Interest (CEI).

The purpose of these roadmaps is to:

- highlight the **industrial, technological, environmental and societal issues**;
- draw up coherent, shared visions of technologies and the sociotechnical system in question;
- identify the **technological, organisational and socio-economic locks** to be overcome;
- associate **time-based objectives** with the priority research topics in terms of technological availability and deployment;
- prioritise needs of the **industrial research, research demonstrator, preindustrial experimentation and technology test platform**, which then act as a basis for:
 - drawing up CEIs;
 - programming research within the ADEME and other institutions such as the French National Research Agency (ANR), the French national strategic committee for energy research (Comité stratégique national sur la recherche énergie) or the French national alliance for the coordination of energy research (ANCRE).

These research and experimentation priorities originate from the junction of the visions and locks, and they also take into account **French capacities in the fields of research and industry**. Roadmaps can also refer to exemplary experiments conducted abroad and make recommendations in terms of industrial policy.

This roadmap shall be regularly updated.

In order to draw up this roadmap, we consulted with **a group of experts** from major private contractors, a contaminated wasteland developer, stakeholders involved in pollution control and public research and finally the ADEME.

1. Future Investments (Les Investissements d’Avenir) continue along the path set by the Research Demonstrator Funds managed by the ADEME. The four programmes involved are: Renewable, low-carbon energy and green chemistry (1.35 billion Euros), Vehicles of the future (1 billion Euros), Smart grids (250 million Euros) and Circular Economy (250 million Euros).

List of members of the group of experts²

Nature of the body	Experts	Member body
Privately-owned company	Pascal Moran and Eric Gernot	CETH ²
	Franck Masset	PSA Peugeot Citroën
	Hélène Pierre and Stéphane Hody	GDF-Suez
	Marianne Julien	Air Liquide
	Patrick Bouchard	Héliion (Areva Group)
	Alexandre Lima	Veolia Environnement
	Marc Aubrée	France Telecom
	Bernard Declerck	EDF
	Michel Jehan	McPhy Energy
	Philippe Mulard and Daniel Le Breton	Total
	Didier Grouset and Samuel Lucoq	N-Ghy
	Patrick Maio, Jean-Christophe Lanoix, Perrine Tisserand	Hinicio
Association and local authority	Pierre Beuzit and Michel Junker	Alphéa
	Frédéric Meslin	Mission Hydrogène Pays de Loire
	Claude Derive	AFH2 ³
	Matthias Altman	Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST, Germany)
	Hugo Vandenborre	V-Energy (Belgium)
	Jean-Marc Pastor	Senator of the Tam, CEO of the Pyrenees association
	Jérôme Biasotto	Rhone-Alps Regional Council
	Frédéric Solbes	AFNOR
Research body	Paul Lucchèse and Alain Le Duigou	CEA
	Claude Lamy	CNRS/University of Poitiers
	Florent Petit	FC LAB institute
	Alexandre Rojey	IFP Energies nouvelles
	Cécile Barbier	UTT ⁴
Public body	Axel Strang	MINEFI - MEDDLT / DGEC ⁵
	Bernard Frois	ANR-NTE ⁶
	Daniel Clément, Karine Filmon, Loïc Antoine	ADEME

2. This roadmap is based on the works performed by Hinicio, a service provider taking part in holding debates and publishing works. The group of experts also received support from a technical office comprised of Luc Bodineau and Michel Gloria of the ADEME.

3. European company of hydrogen technologies.

4. French hydrogen association.

5. Technological university of Troyes.

6. Ministry of the Economy, Finance and Industry – Ministry of Ecology, Sustainable Development, Transport and Housing / General directorate for energy and the climate.

7. National research agency - New energy technologies.

I Subject area of this roadmap

Subject area

Hydrogen energy and fuel cells

This roadmap covers two main topics: the use of hydrogen gas as an energy and fuel cell technology.

Dihydrogen gas (H_2), more commonly known as “hydrogen”, can be used in various different applications due to its high energy potential. Because this gas does not exist in a natural state, it must be manufactured from a primary energy source, then transported, stored and distributed to the user. **Hydrogen as a carrier** or **hydrogen energy** is often spoken of as an energy carrier carrying energy between a primary source and its end use.

This roadmap covers the energy potentials of hydrogen, even if this gas is mainly used today in industrial applications as a chemical compound (*outlined below*). This notion of industrial hydrogen does not fall within the scope of this roadmap, however shall be taken into account as an existing industry related hereto.

Hydrogen energy and fuel cell industries are connected to each other: They may be complementary in nature, however also develop independently from each other. For example, the development of hydrogen energy is not mandatory for the development of fuel cells and vice-versa.

Definitions

Hydrogen energy: hydrogen used to cover energy needs. It is converted into electricity, heat or a driving force according to the desired end use.

Industrial hydrogen: hydrogen used as a chemical compound in industrial methods, mainly in refining and ammonia production. New methods in steelworks and second generation biofuel production could increase these industrial hydrogen uses in the future.

Fuel cells: these electrochemical converters produce electricity and heat by fuel oxidation and oxygen reduction. The fuel used may be liquid or gaseous: hydrogen, natural gas, methanol, ethanol, biogas, liquefied petroleum gas, petrol, diesel. Their size may vary from watts to megawatts, ranging from embedded electronic applications to stationary industrial facilities.

Hydrogen energy and fuel cell applications

Hydrogen energy and fuel cells can be applied in many different fields.

Stationary applications

In the field of residential and tertiary buildings, industry and power grids, this technology may enable energy to be stored and ensure heat and electricity supply: small-scale cogeneration (several kilowatts (kW)), medium-scale cogeneration (several tens to several hundreds of kW), large-scale cogeneration (several megawatts (MW)). These can therefore contribute to developing energy-positive buildings and sectors – that produce more energy than they consume, in addition to **smart grids** – that use information and communication technology to optimise elasticity generation and distribution and better relate supply and demand between producers and consumers.

Mobile applications

Hydrogen can feed some vehicles equipped with internal combustion engines running on gas, such as buses or household waste collection trucks. The 20% hydrogen/80% natural gas mixture (Hythane[®]) only requires the minor adaptation of current engines.

Fuel cells can be fitted into any vehicle using electrical energy for traction in all fields of transport: road, sea, river, rail and air transport. With regard to privately-owned vehicles, their application in hybrid mode – mode using multiple energy sources – coupled with batteries could be considered: the integration of a hydrogen tank and a fuel cell on-board an electric vehicle will increase its autonomy and reduce recharging times (2G or second generation electric mobility (the first generation being the electric vehicles under development)). The extent of hybridisation can be adapted to suit the use and type of vehicle.

Early or niche market applications

Aside from these two generic uses, hydrogen and fuel cells were initially demonstrated for more specific niche market uses, referred to as early markets, as they correspond to applications that are the closest to being marketed:

- material handling equipment for logistics centres and airports; special vehicles for city use or use within buildings;
- power supply for isolated sites such as relay antenna and telecommunication bases;

- electrical emergency back-up units for critical or strategic use (computer servers, hospitals, telecommunication relays) or more generally, to support faulty power grids for example in developing countries.
- mobile applications: low-power fuel cells can be used as portable power supply means or to power mobile objects such as telephones, computers, music players and portable lighting devices.

Figure 1 below summarises the state of maturity of these different applications.

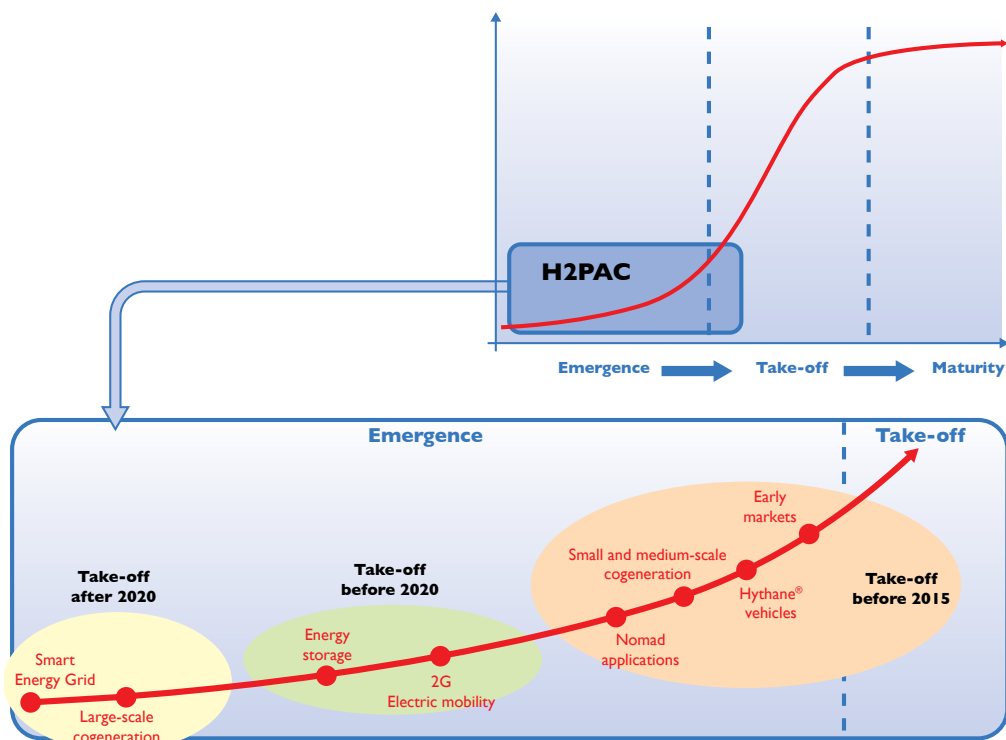
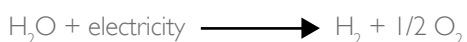


Figure 1: Level of maturity of applications for hydrogen as an energy carrier and fuel cells (source: group of experts).

Hydrogen production

The dihydrogen molecule is not available naturally, even though the hydrogen atom enters into the chemical composition of different bodies such as methane, water or any organic matter. This must therefore be produced via methods using various different renewable or non-renewable primary sources:

- Steam reforming⁸ of natural gas is the most common method used today. It generates carbon dioxide, which could in the future be captured and stored or used (CCUS industry: carbon capture, use and storage). Hydrogen can also be produced via this method from biogas.



- Water electrolysis is the inverse reaction of that taking place in a hydrogen fuel cell: LT or low-temperature electrolysis (< 200°C) is differentiated from HT or high-temperature electrolysis (> 400°C), which requires a more significant heat supply. Low-temperature electrolysis methods use two types of electrolyte: an alkaline solution or a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC). High-temperature electrolysis methods use a solid oxide fuel cell (SOFC).
- Solid biomass thermochemical gasification and pyrolysis methods. These methods produce a gas mixture (carbon monoxide and hydrogen), the hydrogen in which can be extracted.

Other methods are also undergoing more upstream research operations: thermochemical decomposition of water; photochemical decomposition of water and biological production from algae and bacteria.

Today, hydrogen is also co-produced in some chemical methods (chlorine production, coking plant, petrochemical industry, etc.). This hydrogen is either used in a method, burnt or discharged.

For the purposes of this document, **low-carbon hydrogen** shall be differentiated from **renewable hydrogen**, with these terms being based on the nature of the primary source and/or method used to produce the hydrogen (*outlined below*).

Different sources and production methods

Low-carbon hydrogen: hydrogen produced from electricity of nuclear origin, from a renewable energy source (renewable electricity, solid biomass, biogas) or by natural gas steam reforming associated with a CCUS unit. The carbon content of the hydrogen produced or the greenhouse gas emissions generated by this method of manufacture are either reduced or nil.

Renewable hydrogen: hydrogen produced from a renewable energy source (renewable electricity, biomass, biogas).

8. Method for separating hydrocarbon molecules in the presence of steam and heat.

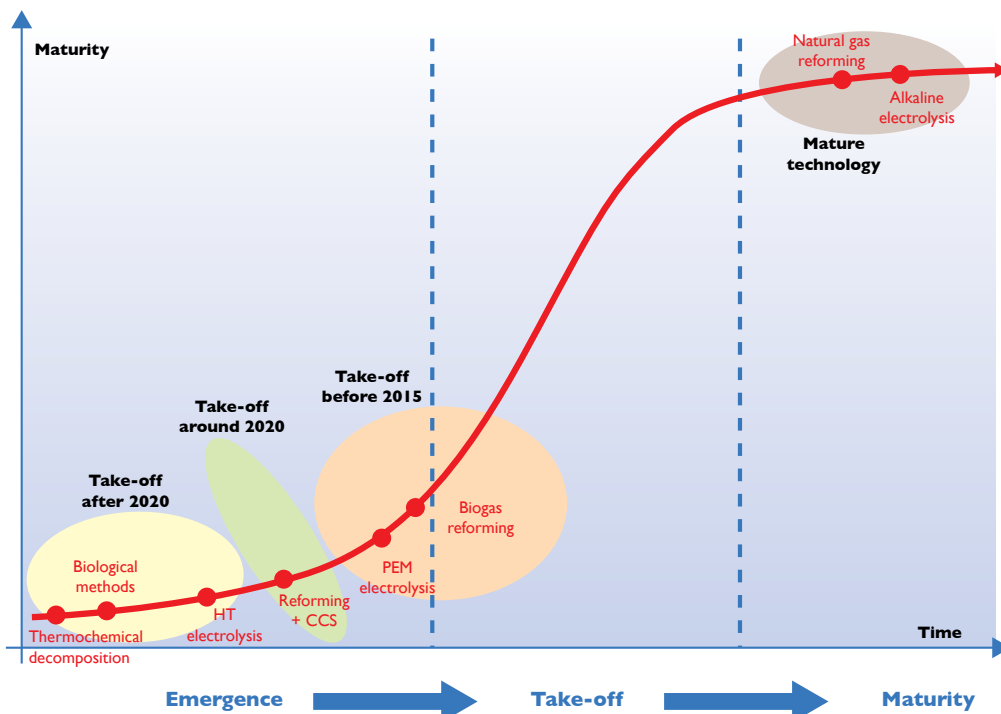


Figure 2: Level of maturity of hydrogen production technology and development perspectives (source: group of experts).

Transport, storage and distribution

Hydrogen supply from its point of production to the end user requires a transport, storage and distribution chain. The low energy density of hydrogen per unit of volume is a major restriction and makes up a key parameter in defining this chain.

Flow in gaseous form – by compressing the gas under different pressure levels, from several tens of bars to 350 or 700 bars – appears to be the most relevant option. Hydrogen liquefaction at -253°C consumes high levels of energy and therefore must remain a niche option. Hydrogen storage in solid matrices, in particular via absorption in metal hydrides, offers alternative solutions that are under development.

Equipment and infrastructures may take on varied forms with the volume of hydrogen to be transported and the distance travelled being the two decisive factors: metal bottles, composite tanks, fuel tankers, dedicated hydrogen pipelines (1,500 km of such pipelines exist in Europe), on-site petrol stations, etc.

The natural gas grid can also contain up to 20% hydrogen by volume without requiring any specific modifications. Some technological obstacles however must still be overcome in order to separate and purify hydrogen downstream of the network.

Geographic perimeter and deadline

From an international to a local perspective

The visions, research priorities, research demonstrator, industrial demonstrator, technology platform and technology experimentation needs identified herein are covered from a national perspective. However where relevant, local, European and international points of view shall be introduced:

- international prior art and foreign initiatives in terms of research priorities and support for technological development, such as the H₂ Mobility and Callux programmes in Germany, the *Japanese Large Scale Fuel Cell Demonstration Programme* or the *US National Hydrogen & Fuel Cell Program*, shall be taken into account (details provided in the Appendix).
- for some applications, development and market perspectives require an international approach: automotive industry, emergency back-up for faulty power grids, mobile applications.
- some characteristics of a regional nature also appear to be decisive factors for other applications: the presence of power and/or gas grids, the availability of renewable resources, climate restrictions and topography.

Deadlines

A 2050 analysis, based on the objective of dividing French greenhouse gas emissions by four for the year 2050 compared to 1990 levels (factor 4⁹), initially highlights differing visions regarding the potential for deploying this industry on a technological, organisational and socio-economic level.

The European “20-20-20” targets¹⁰ and the directions provided by the French Programming Law relating to the application of the Grenelle de l’Environnement provide a framework for the year 2020 – energy efficiency of buildings, developing renewable energy, reducing pollution, developing power grids - in which strategic areas for developing hydrogen energy and fuel cells can be defined.

The identification of certain obstacles helps determine the research priorities and 2015 intermediary points of passage on a technico-economic and organisational level.



9. This objective was set out in Article 2 of the French Orientation Programme for Energy Policy Law (13 July 2005).

10. 2020 objectives: reducing greenhouse gas emissions by 20%, reducing primary energy consumption by 20%, share of renewable energy equal to 20% of the end energy consumption.

2 Challenges

Contributing to guaranteeing national energy independence and preserving resources by promoting the use of renewable energy sources for energy end uses

The renewable hydrogen produced from energy sources available in France appears to be a means for storing, transporting or distributing this energy, which is widespread and intermittent in nature, and thus ease its use.

The final transformation of hydrogen via fuel cells produces varying possible levels of heat and electricity, which enables this hydrogen to be used for leading energy applications: mobility, specific electricity uses, building heating needs. Hydrogen therefore increases the potential for substituting conventional energy sources with renewable energy sources.

The energy benefits generated by hydrogen as an energy carrier partly depend on the overall efficiency of the energy chain between production and end use. The optimisation of this chain thus appears as a key factor determining the energy potential of hydrogen.

Taking part in reducing the greenhouse gas emissions connected to energy end use by using a low-carbon energy carrier

The hydrogen content of greenhouse gases mostly depends on the primary energy source from which it originates. This is reduced when using renewable or nuclear energy sources. Its use, by replacing fossil fuels in energy end uses, and more specifically in widespread uses, will generate clear reductions in greenhouse gas emissions.

Supporting the development of energy grids by promoting storage and intermittence management, and by creating interconnections between these grids

This encourages the development of power grid architectures and control modes. The increasing intelligence of the exchanges taking place between production systems, transport, distribution and consumption sites will lead to a high degree of grid automation in addition to advanced production and electric load management. The deployment of decentralised electricity generation sites will be further supported by a development in the group of stakeholders involved in control operations.

Hydrogen energy and fuel cells offer electricity generation and storage capacities on demand, which can lead to the improved management of renewable energy intermittencies. They therefore contribute to developing power grids to differing extents: buildings, sectors, districts, renewable power generation parks.

Hydrogen as an energy carrier can also interact with the local natural gas transport or distribution network. It therefore offers the possibility of creating connections between power grids, natural gas grids and renewable energy sources, thus contributing to the more advanced control of the generation and distribution of different end energy forms.

Reducing pollution connected to energy use, in particular in urban environments

Mobility in an urban and peri-urban environment, based on internal combustion engine technology, faces problems relating to local pollution: the emission of pollutants such as particulate matter, nitrogen oxide and volatile organic compounds and the generation of noise pollution. Fuel cells, associated with an electric vehicle, constitute a technological breakthrough solution.

Contributing to improving energy efficiency within buildings

Energy use within tertiary buildings and residences is undergoing significant developments. Electricity is playing an increasing role in energy needs, connected to the development of new services and the improvement in the thermal efficiency of building structures. Moreover, energy generation and storage could be generalised on a building or sector scale.

In this regard, fuel cell technology, associated with hydrogen or natural gas, can contribute to meeting energy needs with high conversion efficiency. Heat production, exceeding electricity generation, meets the observed and expected development in energy use within buildings.

Flexibility and modularity

The energy and environmental potential for hydrogen energy is mainly based on the flexibility and modularity of this energy carrier. Capable of being produced from different primary energy sources, transported, stored and used on varying scales, it boasts many possible energy end uses.

3 Key parameters

The purpose of the long-term visions is to describe, in an extreme manner, the terms and conditions for deploying technological, organisational and socio-economic options which, according to the group of experts would enable hydrogen and fuel cells to contribute to achieving the ambitious objectives set such as the Factor 4 objectives.

These visions do not claim to describe the reality in 2050, but to define that which is possible so as to deduce a set of obstacles, research priorities and demonstrator needs. Reality in 2050 will probably be a combination of the visions provided in this roadmap.

Two key parameters have been identified by the group of experts, dividing the possible 2050 realities into four distinctive visions:

First key parameter: Hydrogen production

The multiplicity of the possible methods for producing hydrogen leads to varying degrees of implementation or varying levels of centralisation. In an extreme manner, two infrastructure logic systems can be identified:

Centralised production:

Hydrogen is produced in large quantities on a restricted number of sites. Large-scale facilities implement the following methods:

- steam reforming of natural gas with CCUS,
- high and low-temperature electrolysis on the site of use or attached to large-scale electricity generation sites (offshore wind farms, nuclear power plants),
- biomass gasification and steam reforming,
- new mass production methods: thermochemical decomposition of water; biological methods.

Decentralised production:

Hydrogen is produced by numerous small and medium-sized facilities spread throughout the nation. The production means implemented are as follows:

- biomass gasification and steam reforming,
- electrolysis, connected to the grid or attached to small and medium-sized renewable electric power plants,
- new processes: photochemical decomposition of water; biological methods.



Second key parameter: Uses

The flexibility and modularity of hydrogen as an energy carrier and fuel cell technology leads to applications varying in size, implementing relatively high volumes of hydrogen:

Intensified uses:

Hydrogen can be used in large quantities on a restricted number of sites for industrial and energy purposes:

- industrial uses: fuel refining, biofuel production, synfuels, the chemical industry, steelworks.
- the production of electricity and heat for stationary use: large-scale cogeneration (> 50 MW) implementing fuel cells using hydrogen or other fuels (such as Hythane[®], biogas).

Widespread uses:

Small quantities of hydrogen are consumed in a widespread manner throughout the nation. Fuel cells are used for widespread mobile and stationary applications:

- small and medium-scale cogeneration (from 1 kW to 1 MW) in the field of buildings and industry, operating on hydrogen, natural gas, Hythane[®] type mixtures or biogas.
- land, sea or river vehicles equipped with fuel cells associated with electric traction or using a Hythane[®] type mixture in an internal combustion engine.
- various widespread applications: mobile objects, special vehicles, emergency power supply back-up units, etc.

By combining these two parameters, four extreme visions have been defined (described in figure 3 below), which represent four possible configurations from a national perspective.

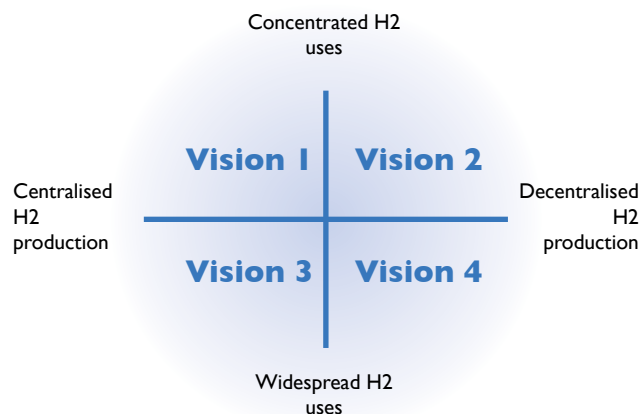


Figure 3: Position of the 2050 visions according to the key parameters

4 The 2050 visions

Each vision, characterised by a method for producing hydrogen and means for using the hydrogen and fuel cells produced, depends on the infrastructures specific thereto.

The following tables explain in detail and for each vision, what these infrastructures could be and state their possible interactions with other energy sectors and the main socio-economic issues faced.

Vision I: low-carbon hydrogen for industrial use

HYPOTHESES	CENTRALISED hydrogen production	<ul style="list-style-type: none"> Natural gas reforming with carbon capture and storage High and low-temperature electrolysis (on the site of use or attached to large-scale electricity generation sites, in particular offshore wind farms and nuclear power plants) Biomass gasification and biogas reforming New methods (thermochemical decomposition of water, biological methods)
	INTENSIFIED hydrogen uses	<ul style="list-style-type: none"> Industrial uses: classic fuel refining, biofuel, synfuel, the chemical industry, steelworks, etc. Large-scale cogeneration (> 50 MW). Small and medium-scale cogeneration units with fuel cells operating on natural gas or biogas.
CONSEQUENCES	Infrastructure	<ul style="list-style-type: none"> Infrastructure reduced to a strict minimum, limited to industrial sites with, in some cases, short-distance interconnections between some sites via pipelines (dedicated hydrogen pipelines or pipelines for hydrogen-natural gas mixtures). Storage: limited needs due to the in-depth knowledge of supply and demand. Mass buffer storage facilities to be provided for hydrogen originating from renewable or nuclear energy sources.
	Interactions and synergies with other energy sectors	Synergies with CCUS sectors and biomass, second generation biofuel and other synfuel production sectors, with renewable energy, nuclear power stations, the power grid and the natural gas grid and natural gas uses, in particular within buildings.
	Skills and stakeholders	The important role played by historic energy and hydrogen producers and distributors in addition to the CCUS industry. Skills specific to fuel cells: small, medium and large-scale cogeneration
	Economic aspects	<ul style="list-style-type: none"> The importance of carbon, natural gas and electricity prices The possible appearance of an actual hydrogen market
	Social aspects	No change in lifestyles

This vision is the closest to the current situation and will not require any development taking place in the current economic system. It partly relies on the installation of CCUS technology. It also depends on the development of the biofuel industry.

The technological progress required essentially involves the mass production of hydrogen. High and low temperature electrolysis, CCUS. Cogeneration via fuel cells must also have proven its potential: current technology must be improved and be adapted to suit these uses (flexibility, reliability, remote control) with reduced

costs (viable economic models for small, medium and large-scale cogeneration).

The main obstacle resides in the desire shown by industrialists to set up mass production methods for low-carbon hydrogen. The carbon market and the development of the European Union Emissions Trading Scheme (EU ETS) will be strong incentives, as will future political choices made in terms of these environmental issues. Carbon constraint must therefore be significantly increased to encourage industrialists to change direction and produce low-carbon hydrogen.

Vision 2: renewable hydrogen for the industry

HYPOTHESES	DECENTRALISED hydrogen production	<ul style="list-style-type: none"> • Biomass gasification and biogas reforming • High and low-temperature electrolysis (attached to small and medium-sized renewable energy power plants and/or connected to the grid) • New methods (photochemical decomposition, biological methods)
	INTENSIFIED hydrogen uses	<ul style="list-style-type: none"> • Industrial uses: classic fuel refining, biofuel, synfuel, the chemical industry, steelworks, etc. • Large-scale cogeneration (> 50 MW). • Small and medium-scale cogeneration units with fuel cells operating on natural gas or biogas.
CONSEQUENCES	Infrastructure	<ul style="list-style-type: none"> • The presence of an infrastructure to collect hydrogen from multiple widespread production sites for transportation to sites for intensified use. • The use of the existing natural gas grid and construction of a dedicated hydrogen pipeline network. • The existence of large and small storage facilities located close to production and consumption sites
	Interactions and synergies with other energy sectors	Synergies with second generation biofuel and other synfuel sectors, the natural gas grid and natural gas uses, in particular within buildings, the biomass sector, renewable energy and the power grid.
	Skills and stakeholders	<ul style="list-style-type: none"> • New skills required: decentralised hydrogen production, transport and storage, production of electricity and heat by cogeneration. • New stakeholders: small renewable energy producers, biomass deposit operators, intermediaries between local hydrogen producers and sites for intensified use. • Possible appearance of local operators responsible for the adjustment taking place between the different energy carriers (electricity, natural gas and hydrogen).
	Economic aspects	<ul style="list-style-type: none"> • A hydrogen price high enough to make the high infrastructure investments profitable • The development of an open national market
	Social aspects	No change in lifestyles, however local production means

In this vision, hydrogen-based solutions are developed if the cost of hydrogen is competitive and if its use leads to profits in terms of greenhouse gas emissions (in particular when mixed with natural gas). As in vision 1, the carbon constraint imposed by the EU ETS on industrial activities is essential. This vision also requires a significant change in the strategy implemented by major industrialists with regard to their hydrogen provision, which is supplied in a widespread manner throughout the nation. Furthermore, the mandatory development of a large-scale storage and distribution infrastructure will have a high impact on costs.

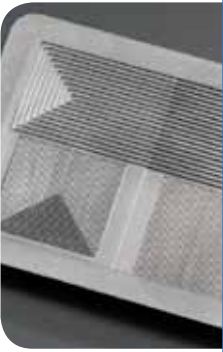
Given the situation today, this vision seems less likely to occur than the previous vision. The injection of hydrogen into the natural gas grid can however be a transitory economic solution, as this would bypass the need to invest in new infrastructures.

Vision 3: low-carbon hydrogen in the national grid

HYPOTHESES	CENTRALISED hydrogen production	<ul style="list-style-type: none"> Natural gas reforming with carbon capture and storage High and low-temperature electrolysis (on the site of use or attached to large-scale electricity generation sites, in particular offshore wind farms and nuclear power plants) Biomass gasification and biogas reforming New methods (thermochemical decomposition of water; biological methods)
	WIDESPREAD hydrogen uses	<ul style="list-style-type: none"> Transport: electric ships or land vehicles (fuel cell alone and/or in hybrid mode with batteries), combustion engines vehicles using a Hythane[®] type mixture Small and medium-scale cogeneration (hydrogen, natural gas, biomass, biogas) Energy supply to mobile objects (micro-computers, telephones, multimedia objects) Emergency back-up power generators (data centres, hospitals, etc.) Auxiliary power units (aeronautical applications, the maritime industry) Hydrogen uses for small industrialists
CONSEQUENCES	Infrastructure	Top-down centralised management system for energy supply, essentially very similar to the architecture of the current energy grid: <ul style="list-style-type: none"> Natural gas grid for hydrogen transport and distribution as a hydrogen-natural gas mixture (such as Hythane[®]). Dedicated hydrogen pipeline network Transport network (road, rail, river transport) for hydrogen distribution in liquid and/or gaseous form Network of hydrogen and/or Hythane[®] vehicle refill service stations.
	Interactions and synergies with other energy sectors	Synergies with CCUS and biomass production sectors, with renewable energy, nuclear power stations, the power grid and the natural gas grid, in particular within buildings, electric vehicles and natural gas for vehicles
	Skills and stakeholders	<ul style="list-style-type: none"> New skills: low-carbon hydrogen production, management of hydrogen and energy macrogrids. The important role played by energy stakeholders in managing macrogrids (smart energy grids) and supplying generalised energy services (electricity, gas, hydrogen, heat) The important role played by historic energy and hydrogen producers and distributors in addition to the CCUS industry.
	Economic aspects	<ul style="list-style-type: none"> The appearance of an open hydrogen market
	Social aspects	The generalisation of user contacts with hydrogen and fuel cell applications

This third vision corresponds to a top-down centralised management system for energy supply that is essentially very similar to the current energy grid architecture. Nonetheless, the integration of hydrogen into the future energy mix using this configuration requires significant changes to the energy market. The interconnection between different energy grids requires their simultaneous and integrated management. Grid infrastructures from hydrogen distribution to its widespread uses also represent a large investment.

The large-scale development of hydrogen as a new energy carrier also requires a strong political stance to be taken on the large project model and appropriate support mechanisms, in particular for infrastructure deployment. Carbon cost and other types of incentives play a leading role in the realisation of this vision.



In addition to the technological progress described in the first vision (production of hydrogen by electrolysis, CCUS, new mass production methods, cogeneration), other technological obstacles exist hindering hydrogen use, in particular with regard to transport. Hydrogen storage must also be studied and tested so as to determine the storage modes (mass versus widespread), technology adapted to suit each application and its optimal storage location and dimensioning.

Given the omnipresence of new hydrogen applications in the everyday life of citizens, managing social adhesion is fundamental.

Vision 4: a local renewable hydrogen economy forming a network across the region

HYPOTHESES	DECENTRALISED hydrogen production	<ul style="list-style-type: none"> • Biomass gasification and biogas reforming • High and low-temperature electrolysis (attached to small and medium-sized renewable energy power plants and/or connected to the grid) • New methods (photochemical decomposition, biological methods)
	WIDESPREAD hydrogen uses	<ul style="list-style-type: none"> • Transport: electric ships or land vehicles (fuel cell alone and/or in hybrid mode with batteries), combustion engines vehicles using a Hythane® type mixture • Small and medium-scale cogeneration (hydrogen, natural gas, biomass, biogas) • Energy supply to mobile objects (micro-computers, telephones, multimedia objects) • Emergency back-up power generators (data centres, hospitals, etc.) • Auxiliary power units (aeronautical applications, the maritime industry, etc.) • Hydrogen uses for small industrialists
CONSEQUENCES	Infrastructure	<p>Widespread dispersed production throughout the nation and close to the site of use:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Microgrids on a city or county-wide scale • Use of local natural gas circuits • Network of hydrogen and/or Hythane® vehicle refill service stations • Hydrogen production devices directly installed in private households or service stations • Widespread storage facilities
	Interactions and synergies with other energy sectors	Synergies with the biomass sector; with renewable energy, the power grid and the natural gas grid, in particular within buildings, electric vehicles and natural gas for vehicles
	Skills and stakeholders	<ul style="list-style-type: none"> • New skills: decentralised hydrogen production, transport and storage, production of electricity and heat by cogeneration, microgrid management • The important role played by small electricity producers and biomass site operators, local stakeholders (SMEs and regional authorities) and major industrialists benefiting from a high local component
	Economic aspects	<ul style="list-style-type: none"> • High storage costs
	Social aspects	Generalisation of user contacts with hydrogen and fuel cell applications, proximity of users with production sites and distribution networks

Vision 4 corresponds to a situation involving the decentralisation of decision-making processes in the energy field. The integration of different energy carriers (electricity, gas, hydrogen) results in optimising the management of energy microgrids according to the energy demand and local availabilities (biomass, natural gas, electricity). This requires an in-depth transformation of the energy markets, which can only result from a strong political desire both on a national and local level.

With regard to the issue of infrastructure deployment costs, this vision leads to savings made in terms of numbers as opposed to vision 3, where most savings are made in terms of scale. The risk involved is also lower than in vision 3 as the investments are smaller and can be supported by a larger number of stakeholders.

The technological obstacles described in visions 2 and 3 (hydrogen production by electrolysis, new decentralised production methods, cogeneration, widespread hydrogen storage, hydrogen vehicles) must be overcome for this vision to develop.

As in vision 3, the advantages of hydrogen in terms of flexibility and modularity must be exploited and social feasibility issues must be handled as a priority.

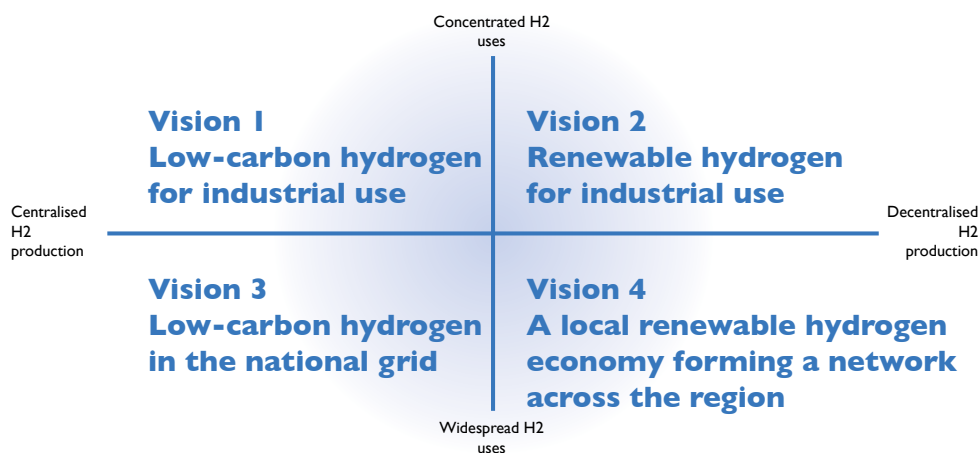
Summary

In a caricatural manner, as illustrated in figure 4 below, the four 2050 visions can therefore be differentiated by :

- the way in which hydrogen is used: visions 1 and 2 correspond to industrial hydrogen, whereas visions 3 and 4 correspond to hydrogen for energy purposes.
- the nature of the hydrogen used: visions 1 and 3 use low-carbon hydrogen, whereas visions 2 and 4 use renewable hydrogen.

The characterisation of these potential future visions raises the following two points:

- hydrogen energy applications must be widespread and only involve two of the four visions provided. Industrial uses, although not the topic of this roadmap, act as a reference scenario and may lead to the emergence of low-carbon or renewable hydrogen production,
- the deployment of fuel cells will capitalise on the widespread uses of hydrogen energy (visions 3 and 4), however is also possible outside of these scenarios. The use of other fuels (natural gas, biogas) will lead to the discovery of applications despite the industrial use of hydrogen (visions 1 and 2).



5 Obstacles and levers

Some background elements, external to the hydrogen energy and fuel cells industry, will more particularly influence the deployment of this technology on a national level.

Carbon constraint, in addition to the price of fossil fuels and electricity, firstly affect the competitiveness of these applications. These also affect national energy systems, which evolve under the influence of other technology and other factors: degree of decentralisation, deployment of renewable energy (RnE), penetration of electric vehicles, etc. Finally, the success or failure of initiatives conducted abroad on the same themes will create favourable or unfavourable conditions affecting the development of this technology in France: the development of early markets and mobile applications is closely connected, for example, to the emergence of international markets.

However, obstacles or stumbling blocks specific to the development of the national industry also exist. These obstacles vary in nature.

Technico-economic obstacles

Some technical and economic challenges must firstly be overcome: these are essentially based on optimising current technological building blocks as far as making industrialisable products available at controlled costs. In a general manner, the deployment of this industry does not depend on the emergence of technological breakthroughs.

With regard to fuel cells, the integration of components into systems, extending their life span, improving their reliability and the low-cost industrial implementation of this technology make up the main most common obstacles. For each piece of fuel cell technology, specific obstacles must also be overcome, such as reducing the quantity of precious metals implemented for low-temperature fuel cells, corrosion and resistance to extreme temperatures for high-temperature fuel cells, etc.

In the field of hydrogen energy, the feasibility of CCUS will be decisive in the implementation of a steam reforming industry for natural gas emitting low levels of greenhouse gases. High and low-

temperature electrolysis methods and hydrogen storage technology must also be optimised in addition to their industrialised manufacture.

Socio-economic obstacles

The applications implementing hydrogen energy and fuel cells are today confronted with a lack of regulatory framework and adapted standards, with current regulations only recognising the industrial production and storage of hydrogen. A shared, improved understanding of the technological risks associated with all possible applications – hydrogen production, storage and transport or fuel cell applications in uses – must lead to the definition of specific regulations ensuring a high level of security while not overestimating these risks.

Collective representations or images can also act as a stumbling block with decision-makers and the potential users of this technology. In France, “hydrogen fear” is often mentioned, reflecting the high concerns on the technological risks connected to its use. These observations and expectations can be penalising if not taken into account.

Economic and industrial obstacles

The economic maturity of this industry can only be achieved in the medium-term, as applications shall only become competitive in a gradual manner with regard to reference technology. Some of the investments required also appear to be rather consequent in size, for example with regard to hydrogen production or hydrogen distribution and storage infrastructures in widespread environments. Finally, this industry is based on various economic and industrial stakeholders boasting multiple skills, none of which control the entire technological chain.

The economic and industrial risk is therefore high for these stakeholders and may lead to a certain wait-and-see attitude: the production of hydrogen energy therefore depends on the



development of fuel cell applications, which itself depends on the development of hydrogen distribution infrastructures, etc. Risk management in these transition phases of the deployment of this industry is a key element for success.

The table hereinafter specifies the nature of the main obstacles for each 2050 vision and their relative significance:

	Technico-economic obstacles	Socio-economic obstacles	Economic and industrial obstacles
Vision 1	++ feasibility of CCUS	+ regulatory aspects alone	+ lack of carbon constraint
Vision 2	++ cost of renewable hydrogen	+ local producers, regulations	+++ widespread industrial supply throughout the nation
Vision 3	+++ feasibility of CCUS, mass hydrogen storage	++ fuel cell users-consumers, regulations	+++ distribution infrastructures, long-term profitability
Vision 4	+++ cost of renewable hydrogen	+++ adhesion of local decision-makers and consumers, regulations	++ local circuit-type infrastructures

Three decisive levers have been determined for overcoming these obstacles.

Political support

Long-term support from the public authorities is required on several levels. They are firstly and in part responsible for defining an appropriate regulatory framework and standard. The public authorities are also at the very heart of the strategic decisions directing the developments of the national energy system, including power grids: the integration of hydrogen energy and fuel cells in this system requires this technology to be taken into account in these strategic decisions. Finally, politically supporting this industry via investment support mechanisms and via increased awareness of the environmental issues involved with this technology, may contribute to reducing the economic and industrial risks that must be assumed by the stakeholders.

Committed major French industrialists, associated with an SME fabric

Given the stationary and mobile applications targeted, the deployment of this technology cannot be considered without the involvement of major energy operators, in addition to industrial manufacturers such as car manufacturers.

The industrialisation of technology and deployment of storage and distribution infrastructures also requires significant investments that can only be made by industrial groups. Their commitment however is intertwined with the development of a fabric of specialised SMEs as the industry requires the implementation of complex and varied skills.

Social acceptability

The 2050 visions based on the widespread use of hydrogen, involve a level of proximity between the users and decision-makers and the hydrogen and fuel cell technology: proximity by their standard integration into buildings and transport; proximity by their connection with renewable energy, by the presence of storage and distribution infrastructures throughout the nation. This technology will be all the more accepted and desired if it meets the following social needs or expectations: contributes to the environmental objectives, increases the service provided in the field of electric mobility, assures the security of electricity supply for sites, etc. The development of hydrogen energy and fuel cell technology, in terms of the services they can provide to users and decision-makers, is a decisive factor for their deployment.

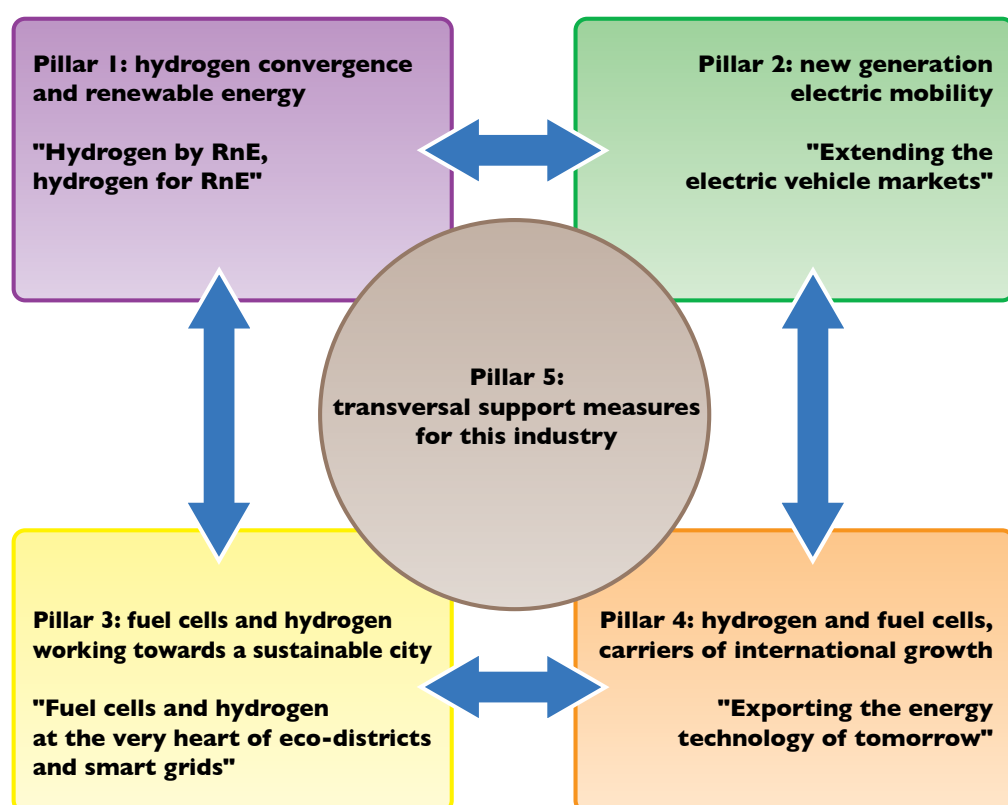
6 2020 Visions

The Grenelle de l'environnement sets the objectives to be reached by the year 2020 for all fields of activity on a national scale.

This is the year by which some technological, organisational or socio-economic effects must be observed so as to reach the Factor 4 objective for the year 2050.

In the field of hydrogen energy and fuel cells, the panel of experts has identified four strategic areas for development in the medium-term, outlined below: these approaches, or pillars, correspond to key applications, the feasibility of

which must be determined by the year 2020 in view of maintaining the maximum potential of this industry for the year 2050. These are the points of passage or the technological progress required for the aforementioned 2050 visions to be realised. A fifth strategic and transversal pillar complements this 2020 vision and supports the four other pillars.



Pillar 1: hydrogen convergence/renewable energy

The deployment of hydrogen applications in harmony with renewable energy makes up the first strategic approach. This involves confirming on the one hand the technical and economic feasibility of decentralised hydrogen production and storage from different renewable energy sources, irrelevant of the hydrogen downstream use. On the other hand, this involves confirming the interest in using renewable energy in the form of hydrogen and the benefits provided by this energy carrier in terms of modularity and flexibility: the use of unavoidable renewable electricity¹¹ that cannot be injected into the power grid, local energy storage within a building or sector; intermittence management for an isolated power grid, etc.

By the year 2020, a renewable hydrogen production capacity of 100 MW (i.e. 3 tonnes of hydrogen per hour) could be selected as an achievable objective, with downstream energy or industrial use. Hydrogen and fuel cells could also represent 5 to 15% of the market for new energy storage needs including reinjection into electricity and/or natural gas grids.

Pillar 2: new generation electric mobility

Hydrogen and fuel cell applications in the field of mobility, and more particularly the demonstration of their complementarity with privately-owned electric vehicles makes up the second major challenge for the year 2020. Their integration into battery-driven vehicles will extend the autonomy of these vehicles and reduce charging times, thus creating a new generation of electric mobility. Hydrogen applications in this field must be represented by a fuel cell/battery hybridisation, which can be considered at different scales, from vehicles almost exclusively driven by fuel cell to electric vehicles equipped with an auxiliary fuel cell (referred to as a *range extender*).

The first applications could involve captive fleets, as these can be fed by dedicated infrastructures. Industrialists estimate that, by the year 2020, part of the technico-economic obstacles could have been overcome, thus enabling vehicles equipped with fuel cells to be pre-commercially deployed for private consumers. This deployment is based on the existence of a minimum hydrogen refuelling infrastructure at this time.



11. Quantity of energy inescapably present or trapped in certain processes or products, which may, at least in part, be recovered and/or used.

Pillar 3: fuel cells and hydrogen working towards a sustainable city

The energy and environmental potential of fuel cells could lead to varied stationary applications promoting the notion of a sustainable city in addition to energy-positive buildings and sectors, and power grids. The use of fuel cells in association with decentralised hydrogen production and storage will optimise energy flows locally: cogeneration, managing local energy supply and demand by storage means, using the renewable energy available, interconnection between gas and electricity smart grids, etc. The use of hydrogen combined with natural gas in the form of a mixture such as Hythane® for local uses also makes up part of this national vision.

The mass market deployment of medium-scale cogeneration systems appears achievable for the year 2020 with small-scale cogeneration at this date reaching a phase of maturity with 5,000 to 10,000 systems installed. According to industrialists, hydrogen and fuel cells would thus represent 10 to 20% of the market for energy-independent buildings and sectors. These deployment operations could revolve around 10 to 20 cities or eco-districts supplied by local hydrogen or natural gas distribution networks.

Pillar 4: hydrogen and fuel cells, carriers of international growth

The markets showing the highest potential for the hydrogen and fuel cell industry are primarily located abroad and more particularly in developing or transition economies, in which power grids may be defective and where the automotive market is growing. Conquering international markets makes up the fourth strategic approach for developing the French industry: French stakeholders are able to position themselves on several high added value links within the value chain, such as high-pressure storage, low-temperature electrolysis, systems integration and more generally on all early applications.

By the year 2020, export could represent 50% of the turnover of French stakeholders in the hydrogen and fuel cell industry, thus positioning the latter as a national growth vector.

Pillar 5: transversal support measures for this industry

The four aforementioned strategic approaches can only be pursued if support measures are set up in parallel for these industries. The purpose of these measures is to overcome some of the aforementioned socio-economic obstacles: defining an appropriate regulatory framework and standard, support policies via economic and/or tax mechanisms, awareness, communication and training programmes.

7 Research priorities, demonstrator needs

The 2020 vision highlights priorities in terms of research works and identifies the preindustrial or research demonstrator needs that appear to be the most important in terms of strategy. These must be used to guide actions undertaken in the short and medium-term.

Pillar I: hydrogen convergence/renewable energy

Research priorities

- | | |
|-----|--|
| 1.1 | R&D on hydrogen production: no particular path must be prioritised or excluded. Research works must involve all methods (low-temperature electrolysis, high-temperature electrolysis, biomass). |
| 1.2 | Technico-economic system studies: this involves validating the technico-economic interest in producing and using hydrogen derived from renewable energy sources. These works must be based on developing economic models and scenarios and on identifying economic and financial support mechanisms which are essential to this industry. |
| 1.3 | Technico-economic studies for the feasibility of smart energy grids: the potential shown by hydrogen and fuel cells in optimising power grids must be confirmed. These works must specify the challenges and obstacles to be overcome. |

Demonstration actions

- | | |
|-----|--|
| 1.4 | Demonstration projects for renewable energy use via hydrogen as an energy carrier: hydrogen use could be energy-based (captive vehicle fleets, electricity and heat production, etc.) or industrial in nature (refinery, steelworks, second generation biofuels, etc.) and substitute non-renewable energy sources. |
| 1.5 | Demonstration projects for unavoidable hydrogen use: the use of 1,000 tonnes of unavoidable hydrogen on an industrial site for energy-based hydrogen applications. |

Pillar 2: new generation electric mobility

Research priorities	
2.1	R&D on PEMFCs, embedded storage and systems: works will aim at optimising performance costs in terms of fuel cell life and according to the materials chosen for hydrogen storage systems.
2.2	Technico-economic study for the national deployment of a hydrogen infrastructure for the automotive industry: this involves exploring the problems within the economic model and identifying the most relevant approach for deploying a large-scale infrastructure on a national level using the available resources and infrastructures.
Demonstration actions	
2.3	Demonstration projects for fuel cell-driven vehicles on captive fleets/tests in 2 to 5 cities: captive fleets form priority targets in view of a 5-year industrial validation operation while looking to minimise supply infrastructure costs. No particular architecture or degree of fuel cell/battery hybridisation must be prioritised.
2.4	Demonstration projects for fuel cell-driven vehicles on captive fleets: this involves deploying vehicles in larger fleets (rental agencies, major groups and service companies), preparing for commercial deployment.
2.5	Demonstration projects on the "ship of the future": the integration of fuel cell systems in river or sea vessels providing traction or as an auxiliary system could also be demonstrated.

Pillar 3: fuel cells and hydrogen working towards a sustainable city

Research priorities	
3.1	R&D on SOFC small and medium-scale cogeneration: research actions must lead to reductions in manufacturing costs while ensuring optimal system reliability and sustainability.
Demonstration actions	
3.2	Coordinated systems tests for stationary domestic small-scale and medium-scale cogeneration systems: multisite tests for a dozen fuel cell-type demonstrators will validate the integration of these systems according to the user profiles and installation conditions connected to residential, tertiary or industrial buildings.
3.3	Coordinated systems tests for storage and generation in buildings: similarly, multisite tests shall be based on fuel cell systems associated with decentralised hydrogen production and integrated storage within buildings.
3.4	Demonstration project for injecting low-carbon hydrogen into natural gas pipelines: this involves validating the technico-economic feasibility throughout the chain – compression, buffer storage, transport, distribution – by developing the regulatory framework and standard.
3.5	Demonstration projects uniting complete renewable hydrogen chains into local circuits: 10 to 15 experiments based on the production, distribution and local use of renewable hydrogen for various different purposes (captive fleets, urban transport, small and medium-scale cogeneration) will demonstrate, on different scales, the applicational diversity and flexibility of hydrogen and fuel cell technology.
3.6	Demonstration project for a smart energy grid on the scale of a city or eco-district: upstream of the end energy uses, the potential shown by hydrogen in optimising the management of gas and electricity power grids could be demonstrated within the scope of specific projects.
3.7	Deploying Hythane®-type vehicle fleets: the use of a natural gas/hydrogen mixture in captive fleets such as buses or household waste collection trucks is essential to this industry and its adoption by local decision-makers and users.

Pillar 4: hydrogen and fuel cells, carriers of international growth

Demonstration actions

- | | |
|-----|---|
| 4.1 | demonstrating special off-road vehicle fleets (auxiliary units, logistics vehicles, handling equipment): this involves fitting 3 to 4 logistics platforms (airport or seaport sites, etc.) with fuel cell technology demonstrating its specific interest and logistics integration into this type of platform, and developing the regulatory framework and standard in view of deployment. |
| 4.2 | Demonstration projects for emergency back-up applications and power supply for isolated sites: similarly, these projects will finalise the implementation of fuel cell technology according to these strategic uses in view of subsequent deployment on a national or international scale. |

Pillar 5: transversal support measures for this industry

Supporting the development of this industry does not make up a research priority or demonstrator need. However, the panel of experts would nonetheless like to specify what these measures could be, as these also affect the ultimate success of the research and demonstration actions.

Public support mechanisms

- | | |
|-----|---|
| 5.1 | Public equipment orders: the deployment of some applications could be supported in this manner, including: vehicles equipped with fuel cells for captive fleets, in connection with the national support plan for rechargeable electric and hybrid vehicles; Hythane®-type vehicles with supply infrastructures; emergency back-up units and power supply for isolated sites (hospitals, telecommunication relays). |
| 5.2 | Setting up tools for managing industrial risks: this type of tool must be drawn up in collaboration with all stakeholders and in particular with those active in the bank and insurance sectors. |
| 5.3 | Financial support and incentive measures: the classic mechanisms that may be mobilised vary in nature: grants for investments in fuel cells according to the power installed, contributions to investments made for hydrogen storage and distribution infrastructures, purchase price for the electricity generated, tax exemptions, regulatory mechanisms such as the "green certificate" applied to hydrogen distribution, the duty to renew emergency back-up units, etc. |

Specific measures

- | | |
|-----|---|
| 5.4 | Coordination and control structure: such a collective structure would represent the stakeholders to the public authorities and conduct strategic operations for this industry, in particular with regard to standards and regulations. |
| 5.5 | Assessing future training needs: the deployment of applications connected to hydrogen and fuel cells will require personnel (technicians, engineers) trained in many different fields. These needs must be assessed and the most relevant training approaches identified. |
| 5.6 | Communication and awareness: the social adhesion to this industry of decision-makers and citizens passes by public communication and awareness campaigns. These campaigns will both raise awareness to the applications and issues connected to hydrogen and fuel cells and lead to a better understanding of public expectations. |

Contribution of the strategic approaches to overcoming the challenges faced

Pursuing the research works identified and conducting demonstration actions will enable us to exploit the full potential offered by hydrogen energy and fuel cells. The summary table below specifies the contribution made by each pillar to the energy and environmental challenges previously identified.

CHALLENGES	Pillar 1	Pillar 2	Pillar 3	Pillar 4
Energy independence and reservation of resources	Production of renewable hydrogen	Renewable hydrogen applications	Renewable hydrogen applications	
Reducing widespread CO₂ emissions	Production of renewable hydrogen	Low-carbon hydrogen applications	Low-carbon hydrogen applications	
Development of energy grids	Management of intermittences and storage, balancing supply and demand		Interconnections between local energy grids	Emergency back-up systems, strengthening isolated grids
Reducing pollution in urban areas		Reduced-impact mobility		
Improving energy efficiency within buildings			Efficient production of electricity and heat	

8 Appendix

Foreign programmes promoting the development of hydrogen and fuel cells

I – Germany

The *National Innovation Program (NIP)* is a hydrogen and fuel cell development programme associating German industrialists and scientists, initiated in 2007 with support from the government. It is mobilising a budget of 1.4 billion Euros over a ten-year period, half of which is comprised of federal budgets and half of which originates from contributions made by industrialists within this industry. This programme revolves around two development plans in the field of transport and stationary applications. 30% of the funds have been allocated to R&D projects and 70% to demonstration projects and for preparing market development.

The programme is managed by an independent and dedicated structure: the NOW, *National Organisation Wasserstoff-und Brennstoffzellen-technologie*. A specific governance system brings together the political, industrial and scientific objectives, thus easing the creation of an industrial policy on hydrogen in the long-term. Four German federal government ministries are involved: The Ministry of Transport, the Ministry of the Economy and Technology, the Ministry of Education, and the Ministry of the Environment.

Transport: the H2Mobility Plan

In the field of transport, Germany is developing the concept of electric mobility, which associates both the development of battery-powered vehicles and that of fuel cell-powered vehicles. More specifically, an agreement protocol, H2Mobility, was signed in September 2009 by the Linde, Air Liquide, Air Product, Daimler, EnBW, NOW, OMV, Shell, Total and Vattenfall companies, the purpose of which is to deploy a hydrogen infrastructure for the mass production of hydrogen-based vehicles in 2015.

This agreement provides for the drawing up and validation of an economic model by the year 2015 during an initial non-binding phase for stakeholders. If the results are conclusive, car manufacturers (including Daimler, Ford, GM, Honda, Hyundai, Nissan and Toyota) will commit to producing several hundreds of thousands of hydrogen vehicles for the year 2015, whereas energy and gas companies will set up the infrastructure required to supply vehicles with hydrogen. The year 2015 will therefore probably represent a point of reinforcement or change in German strategy in terms of electric mobility.

Stationary applications: The Callux programme

The German programme Callux aims at easing the deployment of small-scale domestic cogeneration systems. As an integral part of the NIP, the first phase of this programme aims at installing several hundred small-scale domestic cogeneration systems which will remain in operation for eight years. The purpose of this first phase, which ends in 2012, is to demonstrate the technico-economic viability of this solution in view of mass deployment by the year 2015. This project costs a total of 84 million Euros, 40 million Euros of which is financed by the Ministry of Transport and Buildings. This budget supports 50% of the investment made to acquire the equipment required. One of the main advantages of this programme is its ability to mobilise all stakeholders involved in this market around precise objectives: heating system developers and fuel cell integrators (Vaillant, Viessmann, Baxi Innotech, Hexis), leading energy suppliers (EnBW, E.ON, EWE, MVV, VNG) and the scientific community (*Center for Solar Energy and Hydrogen Research in Stuttgart*).

2 – The United States

After having exerted its political leadership at the beginning of the 2000s during the Bush administration, the American federal government now appears much more cautious with regard to industrial avenues involving hydrogen in the transport sector. The priority here appears to be given to electric vehicles fitted with rechargeable batteries and second and third generation biofuels. Some leading groups such as General Motors however continue to develop R&D in the transport sector.

Higher commitments are shown in the development of short and medium-term mobile and stationary applications, which is supported by the Department of Energy (DoE) via its *US National Hydrogen & Fuel Cell Program*. Some specialists such as Fuel Cell Energy, Plug Power, UTC or gas companies such as Air Products appear to be consolidating their positions on early markets such as small and medium-scale cogeneration, emergency back-up power (benefiting from certain structural weaknesses in the power grid, the occasionally very high carbon content of electricity in some American states and allowances available) and material handling equipment. Moreover, the Department of Defense (DoD) remains a prime contractor and regular purchaser of equipment, thus directly or indirectly financing a certain number of development costs for equipment manufacturers within this industry. The *American Recovery and Reinvestment Package* voted in 2009 provides for allowance mechanisms, thus providing significant benefits to fuel cell developers: 30% investment credit for new facilities, specific allowances for the installation of new technology for increasing energy efficiency in government or residential buildings.

In parallel to the support provided on a federal level, industrialists can count on a certain number of large initiatives which stimulate or support local demand, for example:

- The *California Self Generation Initiative*, which grants allowances for facilities of up to 5 MW, using different types of renewable fuels or natural gas.

- The *Palm Desert Energy Independence Act*, which concentrates on the residential sector and reconstruction, with the aim of reducing electricity and gas consumption by 30%, thus providing a range of opportunities to Palm Desert residents, in particular for fuel cells operating on natural gas or hydrogen produced from electrolysis via solar power.

Finally, it should be noted that approximately one hundred hydrogen service stations exist throughout the country, sixty of which are in operation (and thirty of which are located in California alone, twenty of these being on the *Hydrogen Highway*).

3 – Japan

The Japanese strategy revolves around identifying transversal synergies with other political priorities (concerning transport, energy and the environment), in addition to vertical synergies in national conglomerates (for example, Kyocera, Panasonic, Nippon Oil, Toshiba or Toyota).

According to the *Industry Review 2010* published by FuelCellToday, Asia – and mostly Japan – boasted more than 50% of the fuel cell systems installed throughout the world over the last three years, mainly concerning mobile and stationary applications. The residential stationary segment was supported by the *Japanese Large Scale Fuel Cell Demonstration Program*. Launched in 2009, the Ene Farm programme, which groups together Tokyo Gas, Osaka Gas, Nippon Oil, Toho Gas, Saibu Gas Co and Mitsubishi Corporation, targeted marketing 5,000 residential small-scale cogeneration systems in its first year alone. This objective was achieved, in particular thanks to government aids totalling a sum of 1.4 million Yens (i.e. €12,500), covering 50% of the investment costs. The system set up by the government in 2005 provides for progressively reducing public grants according to the sales volumes and therefore aims at easing market introduction.

In the automotive sector, the Toyota group remains the undisputed international leader in terms of developing fuel cell vehicles.

4 – Support from the European Commission

Hydrogen and fuel cells benefit from support from the European Commission via its seventh European Framework Programme for Research and Technological Development (FPRTD 7) and the Strategic Energy Technologies Plan (SET PLAN). This support is more particularly shown by a public-private partnership, established in 2008 and known as the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCHJU), between the European Commission, world industry and research organisations.

The purpose of this partnership is to implement a programme for research, technological development and demonstration activities (RTD&D) so as to accelerate the development and marketing of hydrogen and fuel cell technology. To this end, the FCHJU boasts a budget of 470 million Euros originating from the seventh FPRTD for 2007-2013, to which can be added an equivalent investment made by the industry. A multi-year plan setting out the strategic priorities in terms of RTD&D has been jointly drawn up by the European Commission and the Directorate-General for industry and research. This plan, which clearly influences European political and industrial priorities, is broken down each year into work programmes. Therefore in 2010, a total budget of 89.1 million Euros was dedicated to RTD&D activities by the European Commission, complemented by a contribution from the General-Directorate for Industry.

The FCHJU also benefits from support from the Member States and Countries associated with the 7th FPRTD, united within a consultation group: the Fuel Cell and Hydrogen States Representatives Group. This group acts as an interface between the FCHJU and Member States.

The European Regions and Municipalities Partnership for Hydrogen and Fuel Cells (HyRaMP) was founded in 2008 and groups together more than thirty European regions showing interest in or active with regard to hydrogen and fuel cells. The role of the HyRaMP is to represent the regions' interests to the FCHJU and other European stakeholders within this industry. The partnership therefore set itself the objective of promoting the standardisation of regional activities and financing operations throughout Europe, and the development of joint projects, in particular to promote the deployment of a hydrogen infrastructure. Some French regions are stakeholders in this partnership: Midi-Pyrénées, Pays de la Loire, Rhône-Alpes.

ABOUT ADEME

The French Environment and Energy Management Agency (ADEME) is active in the implementation of public policy in the areas of the environment, energy and sustainable development. To enable them to establish and consolidate their environmental action, ADEME provides expertise and advisory services to businesses, local authorities and communities, government bodies and the public at large. As part of this work the agency helps finance projects, from research to implementation, in the areas of waste management, soil conservation, energy efficiency and renewable energy, air quality and noise abatement.

ADEME is a public agency under the joint authority of the Ministry of Ecology, Sustainable Development and Energy, and the Ministry for Higher Education and Research.



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

www.ademe.fr