

# INERIS

*maîtriser le risque |  
pour un développement durable*

## **DOSSIER**

**Maîtriser le risque pour un développement durable**

**« l'hydrogène, vecteur d'énergie »**

## Sommaire

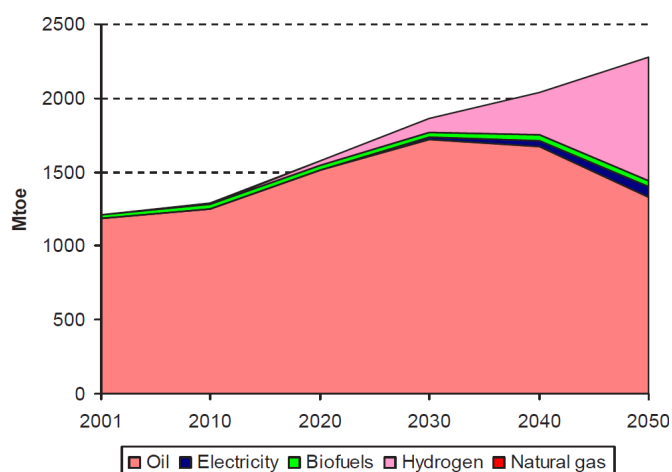
<b>Le contexte</b>	<b>p2</b>
<b>L'Hydrogène vecteur d'énergie</b>	<b>p3</b>
1) Les particularités de l'hydrogène	p3
2) La production de l'hydrogène	p4
3) Le stockage de l'hydrogène	p5
4) Les applications de l'hydrogène vecteur d'énergie	p6
<b>Etudes et recherches sur les risques liés à l'hydrogène, vecteur d'énergie</b>	<b>p7</b>
<b>Les programmes</b>	<b>p8</b>
1) le projet DIMITRHY	p9
2) le projet CYRANO-1	p10
3) le projet HYPE	p10
4) le projet AIDHY	p11
5) le projet BIOH2	p11
6) le projet LOKI R	p12
7) le projet BIOH2 GEN	p12
8) le projet H2E	p13
9) le projet HYCHAIN MINI-TRANS	p13

## Le contexte

La disponibilité des ressources d'énergie fossile, les nuisances environnementales liées à la production et à la consommation d'énergie, la dépendance aux combustibles fossiles obligent à repenser la politique énergétique et à développer de nouvelles sources d'énergie.

Dans ce contexte, la démarche en faveur du développement durable qui concilie les aspects économiques, écologiques et sociaux favorise la réduction des consommations énergétiques, le contrôle de la pollution, la diversification des sources d'énergie primaires et le développement des énergies renouvelables. Les énergies renouvelables (biomasse, éolien, solaire, géothermie, énergie marines...) ne représentaient en 2005 que 8% de la consommation mondiale en énergie.

Le secteur des transports, très dépendant du pétrole (à 98%<sup>1</sup> en 2003), est l'un des secteurs les plus contributeurs aux émissions de gaz à effet de serre. C'est pourquoi l'Union européenne préconise, dans le cadre du Livre Vert *Vers une stratégie européenne de sécurité d'approvisionnement énergétique*, l'utilisation de carburants de substitution dans les transports routiers. La Commission des communautés européennes précise cette recommandation en privilégiant comme carburants alternatifs les biocarburants, le gaz naturel et l'hydrogène :



Consommation mondiale d'énergie dans le secteur de transport  
Données issues de l'étude World Energy Technology Outlook 2050 – WETO H2

D'après une projection de la commission européenne sur le marché de l'énergie, l'hydrogène participera en 2030 à 5% dans le secteur de transport et continue avec une forte croissance les années suivantes.

### Objectifs de la Commission pour les carburants alternatifs (% du total carburants routiers)

Année	Biocarburants	Gaz naturel	Hydrogène	Total
2005	2			2
2010	6	2		8
2015	7	5	2	14
2020	8	10	5	23

Source : Communication de la commission des communautés européennes COM(2001) 547 final

La directive européenne 2003/30/CE demande aux Etats membres de veiller à ce qu'un pourcentage<sup>2</sup> minimal de biocarburants et autres carburants renouvelables soit mis en vente sur leur marché. L'hydrogène figure parmi les nouvelles énergies susceptibles de limiter à long terme les rejets de gaz à effet de serre. En effet, l'hydrogène utilisé dans les piles à combustible ou dans un moteur à combustion interne fournit de l'électricité et de la chaleur avec de l'eau comme seul résidu.

<sup>1</sup> Directive 2003/30/CE visant à promouvoir l'utilisation de biocarburants ou autres carburants renouvelables dans les transports.

<sup>2</sup> La directive européenne 2003/30/CE fixe un objectif d'incorporation de biocarburants à 2% en 2005 et à 5,75% en 2010. En France, l'atteinte de cet objectif de 5,75% a été avancée à 2008. Ce pourcentage est calculé sur la base de la teneur énergétique, de la quantité totale d'essence et de gazole mise en vente sur le marché des Etats membres à des fins de transport.

# L'Hydrogène vecteur d'énergie

Le développement de l'utilisation de l'hydrogène dépend notamment :

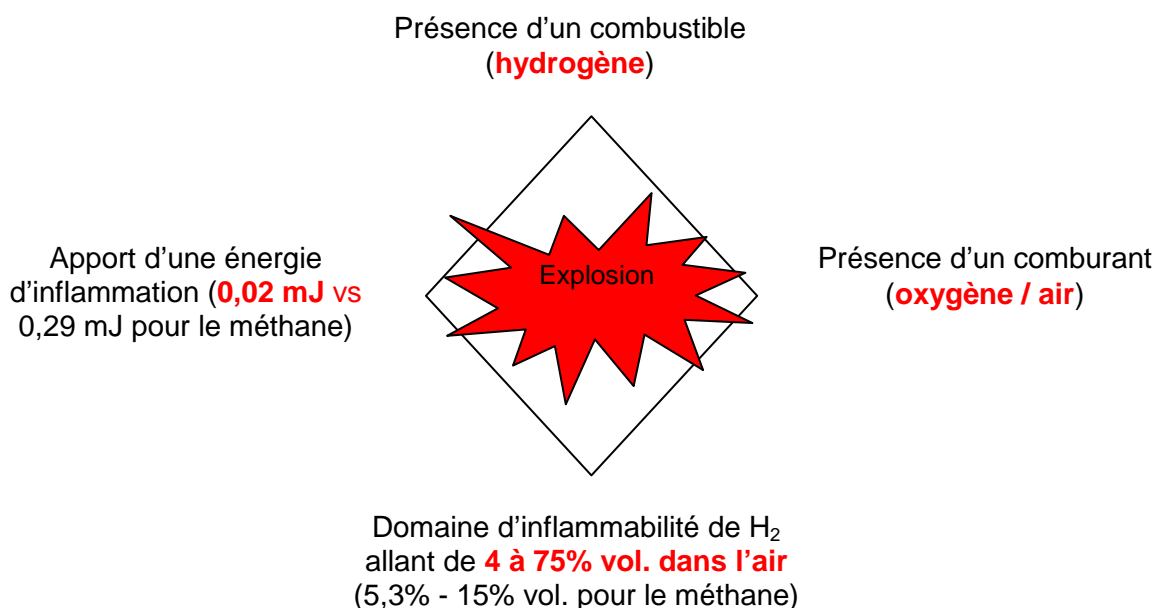
- des progrès techniques en vue de produire l'hydrogène de manière respectueuse pour l'environnement,
- de la mise à disposition d'infrastructures de distribution et de stockage,
- des percées technologiques dans le domaine des systèmes à pile à combustible.

Ces développements doivent répondre aux attentes de sécurité et de coût. Comme pour toute rupture technologique, il faut aussi considérer l'acceptabilité sociétale.

L'hydrogène est l'élément le plus abondant sur Terre. Toutefois, contrairement aux énergies fossiles ou renouvelables comme l'énergie solaire ou la biomasse, il n'est pas disponible en l'état. Il est combiné avec d'autres atomes comme dans les molécules d'eau ( $H_2O$ ) et de méthane ( $CH_4$ ), constituant principal du gaz naturel. C'est un **vecteur d'énergie** qui doit être produit pour ensuite être stocké, distribué et consommé.

## 1) Les particularités de l'hydrogène

- L'hydrogène est un gaz inodore, incolore et non toxique
- L'hydrogène ( $H_2$ ) est la molécule la plus petite. L'hydrogène est le plus léger des gaz : Il se diffuse très vite dans l'air et présente une propension à fuir
- L'hydrogène est la molécule qui dispose de la plus grande densité énergétique (ratio énergie disponible / masse) : 120 MJ/kg, soit 2,2 fois plus que le gaz naturel ou encore 1 kg d'hydrogène libère environ trois fois plus d'énergie qu'1 kg d'essence
- En revanche, il a un faible pouvoir énergétique volumique (10,8MJ/m<sup>3</sup> comparé au gaz naturel 39,77 MJ/m<sup>3</sup>)
- La combustion de l'hydrogène ne génère que de l'eau
- L'hydrogène a une flamme à peine visible à l'œil nu, elle est d'une température de 2300°C dans l'air
- La réglementation le classe comme « extrêmement inflammable » : il a un large domaine d'inflammabilité et une énergie d'inflammation très faible

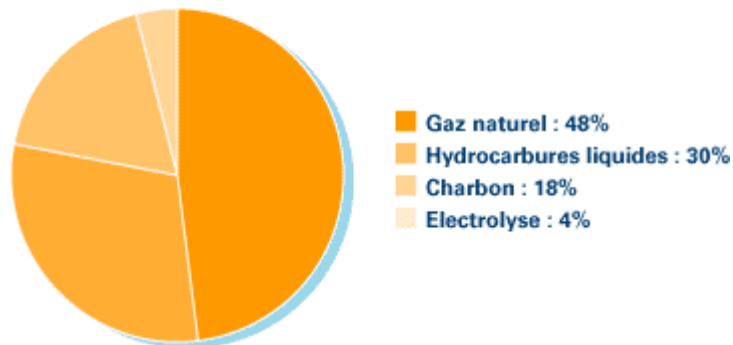


*Conditions d'explosion de l'hydrogène*

## 2) La Production de l'hydrogène

L'essentiel de l'hydrogène produit aujourd'hui est utilisé comme matière de base dans l'industrie notamment pour la production d'ammoniac et de méthanol. La production d'hydrogène nécessite de disposer de molécules contenant des atomes d'hydrogène (hydrocarbures ou eau) et d'une source d'énergie. La production d'hydrogène à partir de gaz naturel est aujourd'hui privilégiée : son constituant principal, le méthane (CH<sub>4</sub>), dispose de 4 atomes d'hydrogène pour un atome de carbone.

### ■ Principales origines de l'hydrogène produit aujourd'hui dans le monde

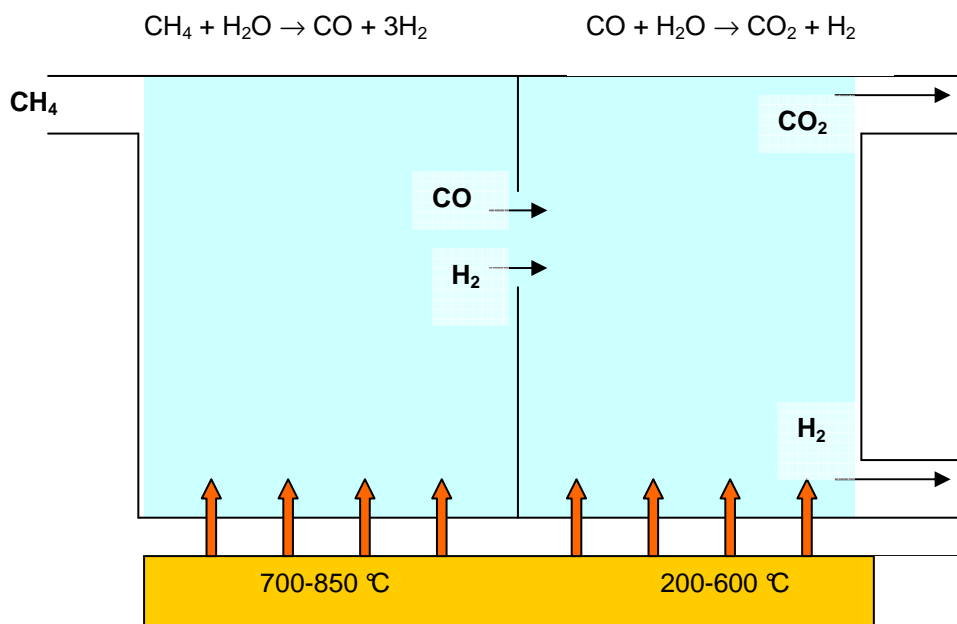


Source : IFP

Les grands principes de ces modes de production sont décrits ci-dessous :

### **Le reformage**

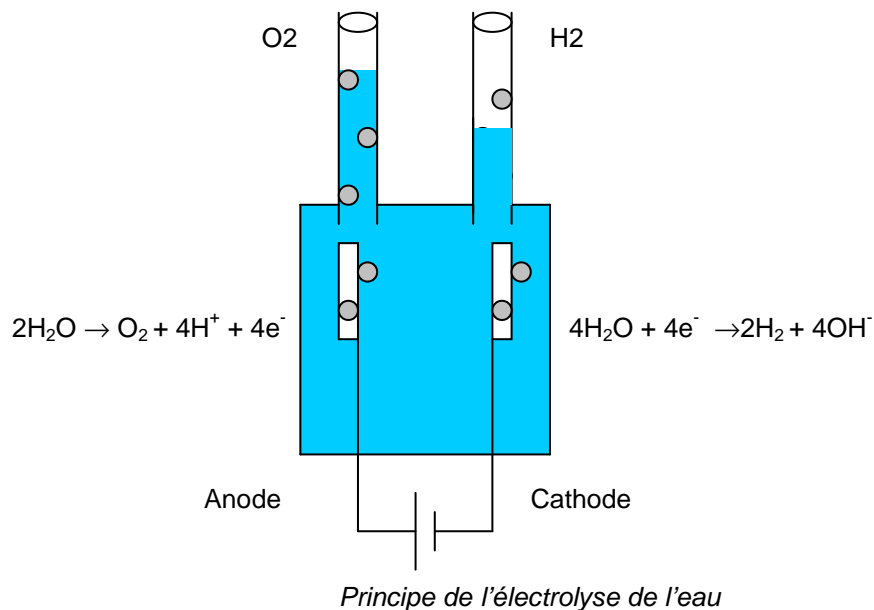
Le méthane contenu dans le gaz naturel réagit à chaud avec la vapeur d'eau pour former de l'hydrogène et du monoxyde de carbone (CO). Le CO formé au cours de cette première étape est à nouveau converti en présence de vapeur d'eau et de chaleur en hydrogène et en gaz à effet de serre : le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Le bilan environnemental de cette technologie dépend donc de la capture et de la séquestration du CO<sub>2</sub> ainsi formé.



Principe du reformage

### **L'électrolyse de l'eau**

Un potentiel électrique est appliqué entre deux électrodes immergées dans de l'eau. Il se dégage de l'oxygène à l'anode et de l'hydrogène à la cathode. La réaction globale est  $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ .



L'électrolyse nécessite l'apport initial d'énergie sous forme d'électricité. Le bilan environnemental du cycle de production de l'hydrogène par électrolyse dépendra donc de la façon dont l'énergie initiale est produite. Plusieurs sources sont envisageables :

- le solaire : la production de cellules photovoltaïques est en forte croissance (de 92,3% par entre 2007 et 2008<sup>3</sup>),
- l'éolien : les générateurs éoliens sont de plus en plus puissants et le coût du kWh en baisse régulière,
- le nucléaire,
- On peut aussi citer l'hydraulique, l'énergie des marées, l'énergie des vagues, la géothermie.

### **La gazéification**

La gazéification est une combustion partielle d'une matière organique (charbon, biomasse) en présence d'air ou d'oxygène dont les quantités disponibles ont été volontairement limitées. Cette transformation partielle produit du gaz de synthèse riche en hydrogène. L'hydrogène obtenu peut être utilisé comme carburant.

### **3) Le stockage d'hydrogène**

L'hydrogène peut être stocké sous forme :

- gazeuse comprimée, à plusieurs centaines de bar, dans des réservoirs à hautes pressions : c'est la solution la plus répandue aujourd'hui.
- liquide cryogénique : l'hydrogène est liquéfié à  $-253^\circ\text{C}$  ce qui consomme de l'énergie et nécessite des réservoirs munis d'un bon isolement thermique.
- stocké « solide » : adsorbé sur un hydrure métallique (ces matériaux sont lourds et ont une faible capacité de stockage – 4 kg d'hydrogène stocké pour 100 kg de matériaux adsorbants) ou adsorbé par des matériaux poreux (solide à grande surface comme des charbons actifs, nanotubes de carbone, nanofibre etc.).

<sup>3</sup> SYSTÈMES SOLAIRES le journal du photovoltaïque N°1 – 2009

#### 4) Les applications de l'hydrogène vecteur d'énergie

L'hydrogène est utilisable soit directement dans des moteurs à combustion interne soit comme combustible dans une pile à combustible (PAC). Une PAC est un générateur électrochimique d'énergie permettant de transformer directement l'énergie chimique d'un combustible (hydrogène, hydrocarbures, alcools,...) en énergie électrique et thermique sans apport d'énergie extérieure.

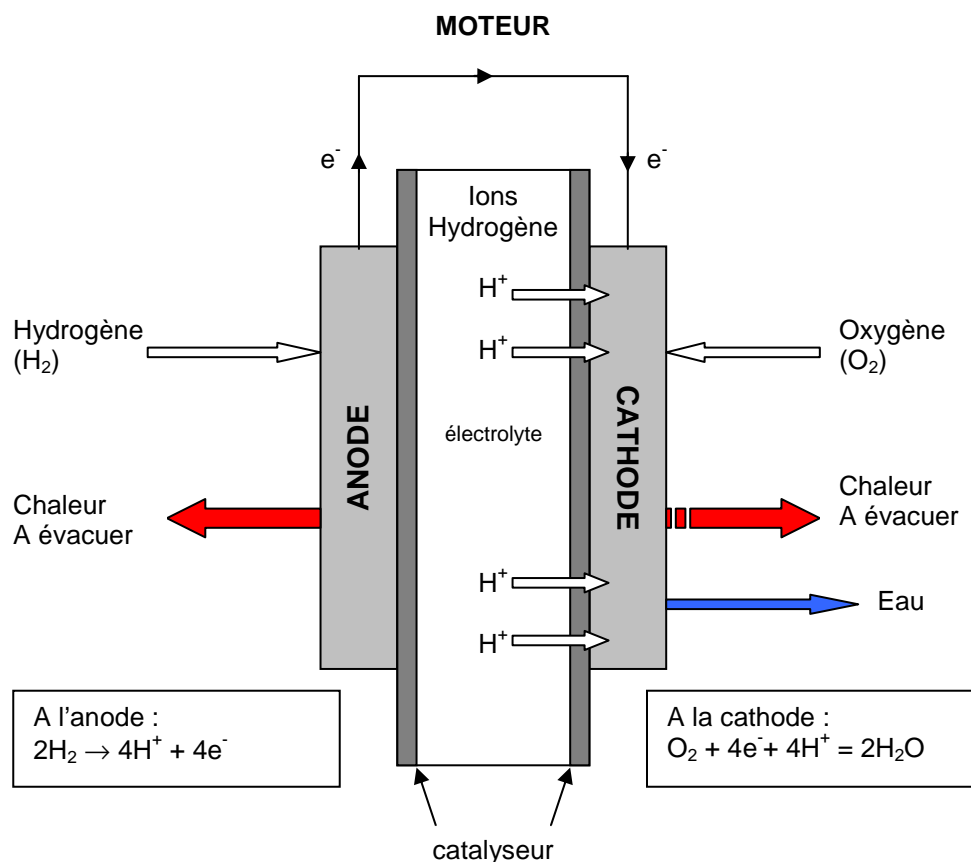
##### Principe de fonctionnement d'une pile à combustible :

Au niveau de l'anode, le combustible se dissocie en ions  $H^+$  et en électrons. L'écoulement des électrons de l'anode vers la cathode s'accompagne de l'établissement d'un courant électrique continu capable d'alimenter un moteur. Les ions  $H^+$  traversent l'électrolyte pour ensuite se combiner au niveau de la cathode avec les électrons et l'oxygène pour former de l'eau.

Les familles de piles à combustible se différencient par la nature de l'électrolyte utilisé (la pile à membrane échangeuse de protons, la pile à oxyde solide sont les plus utilisées...).

Il existe trois grandes applications de la pile à combustible :

- Les piles à combustible embarquées (voitures, bus, etc.)
- Les piles à combustible stationnaires (production d'électricité et de chaleur dans des unités proches des utilisateurs)
- Les piles à combustible portables



Principe de la pile à combustible hydrogène

## Etudes et recherches sur les risques liés à l'hydrogène, vecteur d'énergie

Les risques associés à la production et à l'utilisation de l'hydrogène dans le milieu industriel sont connus et maîtrisés. Le contexte réglementaire y est adapté et les codes de bonnes pratiques existent. Elargir l'utilisation de l'hydrogène à d'autres applications, comme le transport automobile, nécessite d'établir de nouveaux référentiels, de fixer de nouvelles normes et d'adapter le contexte réglementaire.

L'utilisation de l'hydrogène vecteur d'énergie soulève plusieurs difficultés du point de vue de la sécurité :

- **le transport et le stockage**

L'INERIS participe à l'évaluation des risques liés à l'utilisation de réservoirs d'hydrogène et notamment :

- ***pour le stockage sous hautes pressions :***

La faible densité volumique de l'hydrogène nécessite de le transporter dans des réservoirs à hautes pressions. L'éclatement du réservoir et les effets associés (surpressions aériennes et projection de fragments) sont tout particulièrement redoutés. L'INERIS a conduit des tests sur les réservoirs qui ont été soumis à des agressions (feu, tir à balle, chute...) afin d'évaluer d'une part le niveau de fiabilité des dispositifs de sécurité (fusible thermique et limiteur de débit) et d'autre part le maintien de l'intégrité de ces réservoirs en situation accidentelle.

- ***pour le stockage solide :***

La mise en contact accidentelle du composé adsorbant (sous forme de poudre) avec l'air, l'eau ou encore d'autres agents incompatibles est plus particulièrement redoutée compte tenu des risques d'incendie violents qui peuvent en résulter. L'Institut a conduit des tests sur différents matériaux adsorbants qui ont été soumis à des conditions similaires à celles rencontrées en situation accidentelle. Les premiers résultats mettent en évidence, pour les hydrures testés, l'absence de réaction à l'air libre et à l'eau.

- **les fuites et la formation d'atmosphère explosive**

L'hydrogène présente, au regard de sa faible taille moléculaire, une propension à fuir. Dans un milieu confiné et mal ventilé, une atmosphère explosive peut se former. L'INERIS réalise des essais afin d'étudier d'une part la dispersion d'hydrogène et d'autre part les moyens permettant de prévenir la formation d'atmosphères explosives, tels que les systèmes de détection et de ventilation.

## Les programmes

L'INERIS participe à différents projets de recherche nationaux ou européens dans le domaine des risques associés aux nouvelles applications de l'hydrogène :

- le projet Français DIMITRHY (cofinancé par l'Agence Nationale de la Recherche) cherche à établir des données expérimentales et numériques sur les moyens de mitigation du risque hydrogène pour des applications de pile à combustible en milieu confiné ou semi-confiné ;
- le projet Français CYRANO-1 (cofinancé par l'Agence Nationale de la Recherche) s'intéresse à la valorisation de parcs éoliens par stockage d'énergie sous forme d'hydrogène pressurisé dans un gazoduc, avec pour objectif la régulation d'un réseau électrique susceptible de desservir une population de l'ordre de 500 000 personnes ;
- le projet Français HYPE (cofinancé par l'Agence Nationale de la Recherche) vise à développer des réservoirs de stockage haute pression pour l'application automobile, dotés d'une capacité accrue et d'un système de protection incendie ;
- le projet Français AIDHY (cofinancé par l'Agence Nationale de la Recherche) a pour objectif l'étude de la perception et de l'acceptabilité des technologies de l'hydrogène ;
- le projet Français BIOH2 (cofinancé par la Région Picardie) concourt à la mise au point d'un démonstrateur de production en continu d'hydrogène à partir de biomasse ;
- le projet Français LOKI R s'intéresse à la production de gaz de synthèse basée sur l'utilisation d'échangeur-réacteur micro-structuré ;
- le projet Français BIOH2 GEN (financé par Air Liquide) porte sur le développement d'une installation de production d'hydrogène de taille industrielle par le biais de la technique de reformage catalytique à la vapeur à partir de bioéthanol dégradé ;
- le projet H2E (financé par OSEO/Air Liquide) se concentre sur le développement de technologies innovantes pour la production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables, le stockage d'hydrogène et l'industrialisation des piles à combustible. Dans ce cadre, la sécurité du stockage est notamment étudiée ;
- le projet Européen HYCHAIN MINI-TRANS (cofinancé par la Commission Européenne) doit permettre de tester en grandeur réelle des véhicules alimentés en électricité par une pile à combustible dans quatre pays d'Europe, dont la France.

Enfin, l'INERIS est partenaire du réseau d'excellence européen HYSAFE (Safe use of hydrogen as an Energy Carrier) dont l'objectif est de créer un réseau européen d'expertise sur la sécurité de l'hydrogène pour accompagner le développement de la filière.

## 1) le projet DIMITRHY

Ce projet constitue le prolongement du projet ANR DRIVE (2006 - 2009) (Données expérimentales pour l'évaluation des Risques hydrogène, la Validation d'outils numériques et l'Édition de référentiels) qui a permis de produire des données expérimentales afin de mieux évaluer le risque associé à l'utilisation de l'hydrogène à bord d'un véhicule PAC<sup>4</sup>. DRIVE s'intéressait à l'ensemble de la chaîne accidentelle, à savoir la fuite, la dispersion du gaz et la formation éventuelle d'une atmosphère inflammable (ATEX), l'inflammation de cette ATEX et ses conséquences (jet enflammé ou explosion).

Le projet DIMITRHY se propose d'aller plus avant sur la maîtrise du risque hydrogène en produisant des données sur les moyens d'atténuer le risque hydrogène pour des systèmes PAC à application grand public. Le programme de travail s'articule plus particulièrement autour de deux tâches expérimentales :

- l'une liée à la **mitigation d'une atmosphère explosive** (réduire le risque potentiel d'explosion) par ventilation forcée, naturelle et/ou par adaptation de la géométrie du système ;
- l'autre liée à la **mitigation des explosions** (réduire les effets) en apportant des améliorations sur la compréhension des principaux mécanismes de propagation de la flamme en tenant compte des spécificités de l'atmosphère explosive générée et de son confinement. De ces travaux pourront découler des règles de dimensionnement des événements, qui ne sont pas adaptées à l'hydrogène.

Les résultats du projet DIMITRHY devront permettre de combler en partie ce manque de données :

- pour une prise en compte optimisée du risque hydrogène pour le développement et l'implantation des systèmes PAC par les industriels AIR LIQUIDE (AXANE) HELION et PSA PEUGEOT CITROEN ;
- pour les expertises de ce risque réalisées par des organismes de recherches industrielles comme le CEA et l'INERIS ;
- pour servir de base à une future évolution des réglementations au service de l'ensemble des acteurs du domaine.

L'approche système constitue le point d'entrée du projet et son point de sortie. En premier lieu, une approche descriptive des systèmes, que ceux-ci soient stationnaires (AIR LIQUIDE & HELION) ou mobiles (PSA PEUGEOT CITROEN, automobile, AIR LIQUIDE, petits véhicules spéciaux), est réalisée pour définir les paramètres géométriques des systèmes, les scénarii de rejets et leur environnement.

De cette approche, des configurations géométriques et des scénarii génériques seront établis pour les tâches expérimentales sur la mitigation des ATEX et des explosions. Les enseignements tirés de ces analyses permettront d'élaborer des recommandations de conception, d'installation et d'utilisation des systèmes PAC stationnaires et mobiles. Une édition de guides de bonnes pratiques marquera l'aboutissement du projet.

Sur ce projet, l'INERIS intervient sur l'étalonnage des capteurs pour la tâche liée à la mitigation d'une atmosphère explosive et étudie la mitigation des explosions. L'Institut participe également aux travaux de modélisation sur la dispersion et l'explosion de l'hydrogène.

---

<sup>4</sup> Pile à Combustible

## **2) le projet CYRANO-1**

Le projet CYRANO-1 s'intéresse à la production éolienne d'électricité associée à un stockage d'énergie sous forme d'hydrogène gazeux pressurisé dans une canalisation qui assure aussi la fonction de transport d'énergie. La production électrique éolienne est convertie en hydrogène qui est compressé et stocké dans un gazoduc. Le gazoduc alimente une pile à combustible qui renforce la distribution électrique en période de pointe lorsque la production éolienne est insuffisante. Le système « éolien-gazoduc hydrogène-PAC », sera dimensionné pour 500 000 habitants usagers, soit environ la population d'une île (Réunion, Guadeloupe...) ou d'un département français.

Ce projet est une analyse technico-économique, réglementaire et de sécurité d'un réseau intégré "Eolien-électrolyseur-gazoduc sous pression hydrogène-PAC" pour garantir lors d'un pic de demande l'énergie électrique complémentaire nécessaire provenant de sources renouvelables pour une population de 500 000 habitants. Il apportera un éclairage quantitatif sur les plages de fonctionnement de ce système intégré "CYRANO-1" pour garantir l'approvisionnement électrique. La méthodologie et de cette étude et ses résultats seront exploitables pour dimensionner les besoins à des groupes d'utilisateurs de tailles diverses pour la transposer à d'autres ENR telles que le photovoltaïque, ou des réservoirs tampon de nature différente (volant d'inertie, air comprimé,...).

Une analyse des risques de l'installation envisagée est réalisée et les règles de sécurité liées à l'installation des différents composants du système intégré sont recensées par l'INERIS.

## **3) le projet HYPE**

HYPE (Réservoir Hydrogène haute PrEssion), projet auquel participe PSA, l'INERIS, le CEA, l'ENSAM, l'Université de Franche-Comté et Air Liquide, s'intéresse à la sécurité du stockage haute pression de l'hydrogène pour l'application automobile. Un réservoir d'hydrogène haute pression doit assurer deux fonctions principales : l'étanchéité au gaz et la résistance à la pression interne.

Le projet cherche à développer des réservoirs monopolymères avec une paroi unique qui assure les fonctions de liner et de structuration composite. Par ailleurs, HYPE a pour objectif de répondre aux contraintes spécifiques à l'industrie automobile pour intégrer des réservoirs gazeux d'hydrogène, en étudiant les concepts de conformabilité et de modularité. Enfin, l'évaluation du risque incendie est abordée avec l'étude du comportement des fusibles thermiques de réservoirs hyperbares et l'analyse de modes de protection thermique dans l'environnement automobile.

Le résultat du programme doit aboutir à la mise au point d'une bouteille d'hydrogène comprimé avec une capacité de stockage accrue à encombrement et coût égaux, munie d'un système de protection incendie.

L'INERIS intervient dans la gestion du risque incendie et mobilise ses capacités expérimentales pour réaliser les essais feux. L'Institut participe en outre à l'élaboration des recommandations sur le dispositif de protection incendie à mettre en place.

#### 4) le projet AIDHY

Le projet AIDHY se propose, dans la perspective de la mise en place d'une technologie énergétique durable et respectant l'environnement, d'étudier les contraintes et les modalités de l'insertion des nouvelles technologies de l'hydrogène dans le système social actuel. Il a vocation à fournir une grille d'analyse de l'acceptabilité sociétale des nouvelles technologies de l'hydrogène et à rendre compte du devenir vraisemblable de cette nouvelle technologie au sein de la société civile à travers l'identification et la hiérarchisation des scénarios à moyen et à long terme.

AIDHY s'appuie sur une démarche de recherche-action en portant son attention sur trois cas d'étude qui rendent compte des perspectives d'insertion de cette nouvelle technologie sur des territoires d'étude différents (local, national, européen). Le projet s'appuie sur un diagnostic des retours d'expérience nationaux et internationaux en vue :

- d'identifier et de définir les aspects constitutifs et explicatifs de l'acceptabilité sociale et technique liée à l'introduction des nouvelles technologies de l'hydrogène.
- d'identifier et de hiérarchiser des scénarios de devenir vraisemblable de cette nouvelle technologie de l'hydrogène au sein de la société civile.

Ce projet prend appui sur les méthodes des sciences sociales (enquêtes, focus groupes, analyse des controverses) et sur des démarches d'aide à la décision (multicritère). Il vise à proposer aux industriels et aux décideurs publics un outil d'aide à la décision mettant en exergue les perspectives sociétales de l'introduction des nouvelles technologies de l'hydrogène. Cet outil doit également inclure des recommandations pour la mise en place de démarches participatives de concertation pour accompagner les transformations induites par ces nouvelles technologies.

L'INERIS, coordinateur du projet, contribue aux tâches relatives à l'élaboration et l'exploitation d'un questionnaire d'enquête auprès d'un échantillon représentatif de la population, à l'établissement d'une synthèse de la réglementation ainsi qu'à la réalisation des rapports de synthèse finaux du projet.

#### 5) le projet BIOH2

L'objectif de ce projet, soutenu par la Région Picardie, l'Agence Régionale de l'Innovation Picardie (ARI) et le Pôle de compétitivité IAR, est la mise au point d'un démonstrateur de production en continu d'hydrogène à partir de biomasse. Il associe l'Université de Technologie de Compiègne, l'Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, Maguin, BIO3D, CVG, et l'INERIS (avec le concours ponctuel du CEA et de l'IFP).

Le défi technologique consiste à démontrer que l'on peut « gazéifier dans une même installation avec des rendements élevés des biomasses indifférenciées tout en réduisant le coût de l'installation et en optimisant sa robustesse et sa sécurité ».

La technologie retenue comporte 3 étapes :

1. La production de gaz de synthèse à partir de la biomasse en utilisant un procédé basé sur une pyro-gazéification étagée.
2. Le passage du gaz de synthèse à un gaz enrichi en hydrogène par un procédé de CO shift permettant d'optimiser la conversion du CO en H<sub>2</sub>.
3. La séparation des gaz et la production d'hydrogène.

L'INERIS a la charge d'évaluer la sécurité du procédé, de contribuer à la maîtrise des risques pour l'environnement et d'établir la mise en œuvre des bonnes pratiques écotechnologiques.

## 6) le projet LOKI R

L'objectif du projet LOKI R (Low Oxidation Kinetics Reactor) est de développer une nouvelle approche de la production de gaz de synthèse basée sur l'utilisation d'échangeur-réacteur micro-structuré.

Ce développement s'appuie sur une nouvelle approche système de l'usine (architecture, tuyauterie) et conduit à la mise au point d'une technologie d'échangeur et d'échangeur-réacteur micro-structuré à haute performance pouvant fonctionner à température élevée (600-900°C), et sous environnement agressif ( $H_2/CO/CO_2/H_2O/CH_4$  induisant des phénomènes de corrosion notamment).

Le projet se décline en différentes phases : établissement des spécifications requises pour le système (atmosphère, température, temps de séjour...), notamment pour les aspects thermiques et thermochimiques des matériaux envisagés ; dimensionnement fonctionnel ; réalisation de l'échangeur ; tests mécaniques et thermo-hydrauliques ; étude et optimisation du composant réacteur (aspects matériau, assemblage ou design).

Dans le cadre du projet LOKI R, l'INERIS apporte plus particulièrement ses compétences relatives à la sécurité des procédés de production d'hydrogène. L'Institut participe notamment à la définition et au dimensionnement des barrières de sécurité à mettre en place pour assurer une maîtrise des risques suffisantes lors de l'exploitation de ces procédés.

## 7) le projet BIOH2 GEN

BIOH2 GEN vise le développement d'une installation de taille industrielle de reformage catalytique à la vapeur à partir de bioéthanol dégradé, afin de produire un vecteur énergétique propre, l'hydrogène ( $H_2$ ). Ce projet prend en compte :

1. l'optimisation des chemins réactionnels,
2. le développement de catalyseurs performants et procédés d'élaboration associés,
3. le développement d'un concept de réacteur de reformage à taille industrielle,
4. l'optimisation énergétique, environnementale et l'intégration allant du champ à la molécule d'hydrogène,
5. la sécurité et la sûreté industrielles de fonctionnement liées à la conversion de bio-ressources.

Par rapport aux sources énergétiques industrielles classiques (principalement le gaz naturel), le bioéthanol présente des avantages certains : bilan d'émissions de gaz à effet de serre négatif ; caractère liquide et non-toxique ; source d'énergie transportable et stockable facilement, aisément compressible par pompage... Il constitue un facteur d'indépendance énergétique, et présente une sûreté d'approvisionnement avec la filière industrielle bioéthanol actuelle (sucres et amidons agricoles) jusqu'à la filière bioéthanol en développement (à partir de ressources ligno-cellulosiques).<sup>5</sup>

Dans le cadre du projet BioH2Gen, l'INERIS apporte ses compétences :

- dans l'évaluation des risques produits,
- dans l'évaluation et de la maîtrise des risques procédés,
- sur la connaissance du contexte réglementaire.

En outre, il apporte son expertise particulière dans le domaine de la maîtrise des risques liés à la mise en œuvre d'hydrogène.

<sup>5</sup> Le bioéthanol dit dégradé concerne non pas le bioéthanol anhydre (pureté 99,9%) employé dans les carburants mais le bioéthanol produit en amont de l'unité, contenant jusqu'à 10% d'eau ou plus. L'impact sur son coût de production est alors très significatif.

## **8) le projet H2E**

Le programme H2E (Horizon Hydrogène Energie), qui rassemble 19 partenaires sur 7 ans, participe à la construction d'une filière hydrogène-énergie durable et compétitive. Il porte sur le développement de technologies innovantes pour la production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables, le stockage d'hydrogène et l'industrialisation des piles à combustible.

Dans ce contexte de l'hydrogène, il est nécessaire de développer des solutions innovantes pour répondre aux contraintes physiques, environnementales et de sécurité propres aux nouveaux modes de mise en œuvre de l'hydrogène. Du point de vue de la sécurité, ces nouvelles applications se caractérisent par des modalités de mise en œuvre spécifiques, comme l'installation et l'emploi des systèmes en espace confinés et le stockage de l'hydrogène en récipient en matière composite.

Le volet sécurité du programme H2E porte notamment sur ces aspects de stockage et d'utilisation de l'hydrogène. Il étudie le comportement de l'hydrogène dans le cadre de différents scénarios d'accidents à partir de fuites : dispersion, inflammation, explosion. L'objectif est également de comprendre le comportement de récipient de stockage haute pression soumis à des agressions thermiques et mécaniques.

L'INERIS intervient à la fois dans la définition des scénarios d'accidents, l'analyse globale des risques liés à l'hydrogène et sur les aspects théoriques et expérimentaux de l'étude des phénomènes dangereux. Grâce à ses capacités d'essais, l'Institut contribue en particulier à l'analyse des risques de fuites d'hydrogène sous haute pression, à l'étude du risque d'explosion en milieu confiné et à l'étude des réactions de récipient de stockage aux agressions thermiques et mécaniques.

## **9) le projet HYCHAIN MINI-TRANS**

Le Projet HYCHAIN MINI-TRANS doit permettre aux utilisateurs de quatre régions de l'Union Européenne de tester en grandeur réelle des véhicules alimentés en électricité par une pile à combustible utilisant de l'hydrogène : scooters, tricycles, fauteuils roulants, petits véhicules utilitaires et minibus. Il se déploie en Rhône-Alpes pour la France (Communauté d'agglomérations Grenoble Alpes Métropole), en Emilia Romagna pour l'Italie (ville de Modène), en Castilla y León pour l'Espagne (villes de Soria et León) et en Nordrhein Westfalen pour l'Allemagne (Communauté d'agglomérations de la région Emscher Lippe).

Ce projet comprend deux phases :

1. Fabrication des véhicules et développement de l'infrastructure ;
2. tests des véhicules en condition d'utilisation réelle.

Le rôle de l'INERIS est de réaliser un état de l'art des normes et réglementations applicables au niveau national et au niveau européen pour chaque système. L'Institut participe, au niveau européen, aux études de sécurité en vue d'obtenir leur homologation. Il identifie les bonnes pratiques conformément à la révision des règlements et normes existants et en cours de réalisation. L'Institut a également pour mission de former les acteurs et utilisateurs de l'hydrogène sur les aspects sécurité.