



Programme européen de formation des formateurs pour les intervenants

Cours 1

Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

Niveau I

Pompier

Les informations contenues dans ce cours sont destinées au niveau de **pompier** et plus.

Ce sujet est également disponible au niveau IV (Officier spécialisé)

Ce cours fait partie d'un ensemble de documents de formation comprenant des supports de niveaux I à IV :

Pompier, commandant d'équipe, commandant d'incident et officier spécialisé.
Veuillez consulter l'introduction du cours concernant les compétences et les attentes en matière d'apprentissage.

Remarque : Ces supports sont la propriété du Consortium HyResponder et doivent être mentionnés en conséquence. Les résultats de HyResponse ont été utilisés comme base



Clause de non-responsabilité

Malgré le soin apporté à la préparation de ce document, la clause de non-responsabilité suivante s'applique : les informations contenues dans ce document sont fournies telles quelles et aucune garantie n'est donnée quant à leur adéquation à un usage particulier. L'utilisateur utilise ces informations à ses seuls risques et périls.

Le document ne reflète que le point de vue de ses auteurs. La FCH JU et l'Union européenne ne sont pas responsables de l'usage qui pourrait être fait des informations qu'il contient.

Remerciements

Le projet a reçu un financement de Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) dans le cadre de la convention de subvention n° 875089. Le JU bénéficie du soutien du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne et des pays suivants : Royaume-Uni, France, Autriche, Belgique, Espagne, Allemagne, Italie, République tchèque, Suisse, Norvège.

Résumé

Ce cours présente l'introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants. L'hydrogène a été largement utilisé dans l'industrie pendant une période assez longue sous forme de gaz comprimé ou liquéfié. L'hydrogène n'est pas plus ou moins dangereux que d'autres combustibles courants, mais il est différent, avec ses propriétés spécifiques propres et ses risques associés. Une utilisation croissante des applications de Pile à Combustible et de l'Hydrogène (PCH) nécessite une compréhension approfondie des processus, des dangers et des risques, des dispositifs et des concepts de sécurité, ainsi qu'un personnel professionnellement formé pour faire face aux éventuels incidents ou accidents en toute sécurité. Tout ceci exige un changement significatif dans la culture de la sécurité, notamment pour les premiers intervenants, qui devront être à traiter les premiers à traiter des situations d'urgence qui peuvent impliquer de l'hydrogène pressurisé ou liquéfié, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur, dans des zones résidentielles urbaines, sur les routes, à la campagne et dans de nombreux autres environnements différents.

Ce cours a donné un aperçu des systèmes et de l'infrastructure PCH. Les dangers potentiels, les risques, les mesures de sécurité et les concepts associés aux applications stationnaires et de transport des PCH ont été examinés. Un aperçu des principales utilisations de l'hydrogène, des principales méthodes de production, des options de stockage et des modes de distribution a également été présenté.

Ce cours a été développé sur la base des cours originaux issus du projet européen HyResponse (<http://www.hyresponse.eu>).

Mots clés

Pile à combustible, hydrogène, production, stockage, application, sécurité de l'hydrogène

Table des matières

Résumé.....	3
Mots clés	3
1. Public cible.....	6
1.1 Description du rôle : Pompier	6
1.2 Niveau de compétence : Pompier.....	6
1.3 Prérequis : Pompier	6
2. Introduction, champ d'application et cible	6
3. Aperçu de la production, du stockage et de l'utilisation industrielle du H ₂	8
3.1 Production de l'hydrogène	8
3.2 Stockage de l'hydrogène	10
3.3 L'usage de l'hydrogène dans l'industrie	13
4. Véhicules à pile à combustible	14
4.1 Les caractéristiques principales des véhicules à pile à combustible	14
4.2 Voitures à pile à combustible	15
4.2.1 Système de stockage d'hydrogène	16
4.2.2 Système d'alimentation en carburant hydrogène.....	17
4.2.3 Système pile à combustible.....	17
4.2.4 Propulsion électrique et système de gestion de la puissance	17
4.2.5 Caractéristiques et concepts de sécurité.....	18
4.3 Bus à pile à combustible.....	20
4.4 Chariot élévateur à pile à combustible	23
4.5 Aviation.....	25
5. Transport d'hydrogène.....	27
5.1 Poids lourds (PL).....	27
5.1.1 Camions à gaz.....	27
5.1.2 Camions à liquides cryogéniques.....	29
5.2 Trains.....	31
5.3 Canalisations	32
6. Applications stationnaires.....	34
6.1 Systèmes de production combinée de chaleur et d'électricité (PCCE).....	34

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

6.2	Production d'énergie de secours	34
7.	Applications marines	36
8.	Systèmes de stockage d'énergie à base d'hydrogène.....	40
9.	Aperçu des incidents et des accidents.....	45
9.1	Incidents et accidents sur les systèmes et infrastructures de piles à combustible et d'hydrogène (PCH).....	45
9.2	Accidents survenus pendant la production d'hydrogène.....	46
9.3	Un incident dans une station de ravitaillement en carburant	47
10.	Introduction au e-Laboratoire	47
	Références.....	48

1. Public cible

Les informations contenues dans ce cours sont destinées au NIVEAU 1 : Pompier. Des cours sont également disponibles aux niveaux II, III et IV : commandant d'équipe, commandant d'intervention et officier spécialiste.

La description du rôle, le niveau de compétence et les attentes en matière d'apprentissage supposés au niveau du commandant d'équipage sont décrits ci-dessous.

1.1 Description du rôle : Pompier

Un pompier est responsable et doit être capable d'effectuer des opérations en toute sécurité avec des équipements de protection individuel, y compris un appareil respiratoire, en utilisant l'équipement fourni, comme des véhicules, des échelles, des lances à incendie, des extincteurs, des outils de communication et de sauvetage, dans toutes les conditions climatiques dans des zones et dans des situations d'urgence dont on peut raisonnablement prévoir qu'elles nécessitent une intervention.

1.2 Niveau de compétence : Pompier

Formés à l'utilisation sûre et correcte des EPI, des ARI et des autres équipements qu'ils sont censés utiliser, les premiers intervenants doivent être soutenus par des connaissances et des pratiques appropriées. Les comportements qui assureront leur sécurité et celle de leurs collègues doivent être décrits dans des procédures opérationnelles normalisées (PON). La capacité pratique d'évaluer et d'adapter rapidement son comportement face aux risques pour sa propre sécurité et celle des autres est requise.

1.3 Prérequis : Pompier

CEC¹ de niveau 2 : Connaissance factuelle de base d'un domaine de travail ou d'étude. Compétences cognitives et pratiques de base requises pour utiliser les informations pertinentes afin d'effectuer des tâches et de résoudre des problèmes courants en utilisant des règles et des outils simples : travailler ou étudier sous supervision avec une certaine autonomie.

2. Introduction, champ d'application et cible

Les applications des piles à combustible et de l'hydrogène (PCH) dans les secteurs du transport et de l'énergie sont disponibles sur le marché actuel, et il est fort probable que les premiers intervenants soient confrontés à d'éventuels accidents/incidents dans un avenir proche. Le développement des technologies PCH exige que les premiers intervenants comprennent mieux et de manière approfondie les dangers, les risques, les processus et les caractéristiques de sécurité associés aux systèmes et aux infrastructures des PCH. La production de l'hydrogène par électrolyse et le reformage du gaz naturel ; les applications de production d'hydrogène décentralisées ; le stockage d'hydrogène liquéfié ou gazeux ; transport de l'hydrogène et les

¹ Cadre Européen des Certifications (CEC), ou European Qualifications Framework (EQF)

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

activités de manutention ; les véhicules à pile à combustible (par exemple : les cars, les bus, les chariots élévateurs) ; stations de remplissage d'hydrogène ; applications stationnaires de pile à combustible ; les systèmes de stockage d'énergie à base d'hydrogène restent largement inconnus des premiers intervenants. À cela s'ajoute l'absence de procédures opérationnelles normalisées (PON) en cas d'accident ou d'incident sur les systèmes et infrastructures susmentionnés.

L'objectif de ce cours est de présenter aux intervenants un certain nombre d'applications de PCH, de les familiariser avec les risques spécifiques et d'exposer les principales approches de l'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène. Les intervenants doivent savoir que l'hydrogène n'est pas plus ni moins dangereux qu'un autre combustible courant. L'hydrogène a des propriétés spécifiques dont la connaissance facilitera la prise de décision appropriée sur les lieux d'un accident. Les intervenants doivent être formés professionnellement pour faire face à des systèmes d'hydrogène à des pressions allant jusqu'à 100 MPa et des températures allant jusqu'à -253 °C (hydrogène liquéfié) à l'extérieur et à l'intérieur.

Ce cours est le premier d'une série et s'appuie sur les supports développés et fournis dans le cadre du projet (<http://www.hyresponse.eu/>). Un programme international de formation à l'hydrogène pour les premiers intervenants a d'abord été élaboré dans le cadre de l'Initiative pour la sécurité de l'hydrogène (<http://www.hyresponse.eu/curriculum.php>). Il s'agissait de la première étape de la création de la plate-forme européenne de formation à la sécurité de l'hydrogène pour les premiers intervenants. Ce programme a été développé dans le cadre du projet HyResponder (<https://hyresponder.eu>) afin de refléter l'état actuel de la technique et d'intégrer des détails supplémentaires sur l'hydrogène liquéfié, les espaces confinés, les appareils à pression, etc.

Les stagiaires sont encouragés à utiliser ce document pour les assister dans leurs études indépendantes et à rechercher des sources d'informations supplémentaires.

À l'issue de ce cours, un intervenant / un stagiaire devra être capable de :

- D'apprécier la diversité et la richesse des technologies des PCH,
- De comprendre le rôle de l'hydrogène en tant que nouveau vecteur énergétique,
- De reconnaître les difficultés de perception des technologies de l'hydrogène et des piles à combustible par le public,
- D'expliquer les principes de fonctionnement et les aspects de sécurité d'une série d'applications des piles à combustible, notamment les véhicules à pile à combustible, les stations de ravitaillement, le stockage stationnaire de l'hydrogène, les applications de manutention et de distribution de l'hydrogène, la production d'énergie de secours et les systèmes à pile à combustible pour la production combinée de chaleur et d'électricité,
- De donner des exemples d'incidents et d'accidents qui pourraient se produire sur les applications de PCH.

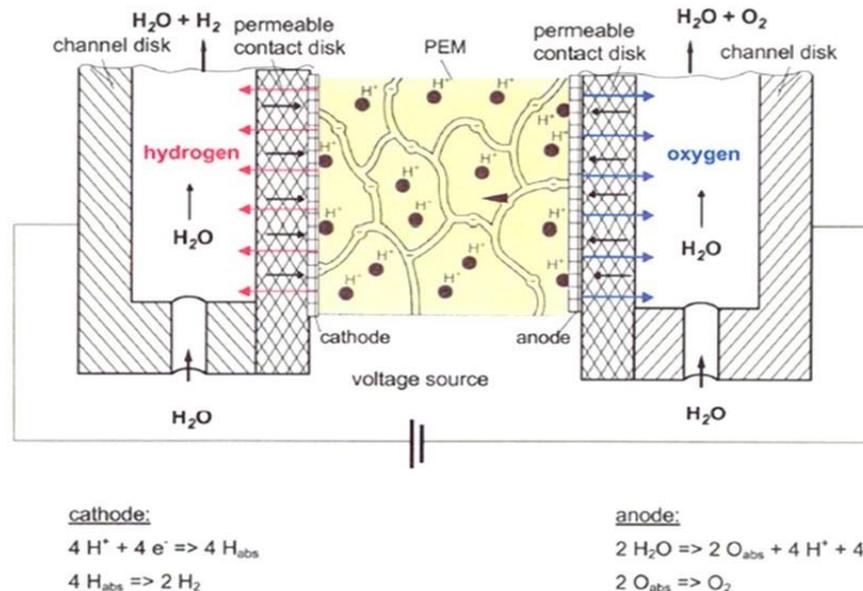
3. Aperçu de la production, du stockage et de l'utilisation industrielle du H₂

3.1 Production de l'hydrogène

Les molécules d'hydrogène ne peuvent pas se trouver dans leur forme pure dans la nature. Ainsi, l'hydrogène doit être produit à partir d'un composé, dans lequel il est contenu, par exemple, à partir de l'eau, du méthane, du méthanol, de l'ammoniac, de l'éthanol, de la biomasse, etc... la production d'hydrogène peut être divisée en deux catégories : une production centralisée à grande échelle et une production décentralisée à petite ou moyenne échelle. La production centralisée fait référence à des usines chimiques établies à grande échelle, produisant en masse de l'hydrogène, qui est ensuite transporté vers les clients. Dans ce cas, l'hydrogène est transporté, parfois sur de longues distances, par des pipelines, par la route ou par bateau. On peut citer comme exemple les unités de vaporeformage appartenant aux grandes compagnies gazières telles qu'Air Liquide, Linde, Air Products, et d'autres. Plusieurs technologies établies sont actuellement disponibles sur le marché pour la production industrielle d'hydrogène. Il existe deux voies commerciales pour la production d'hydrogène : l'électrolyse de l'eau (qui remonte à la fin des années 1920) et les technologies de reformage (introduites en 1960).

L'électrolyse de l'eau est un processus dans lequel l'eau est divisée en hydrogène et en oxygène à l'aide de l'énergie électrique, comme le montre l'équation suivante (1) :





Légende :
 Voltage source → Source de tension
 Permeable contact disk → Disque perméable de contact
 Channel disk → Disque canal
 PEM (Proton Exchange Membrane) → Membrane Echangeuse de Protons
 Hydrogen → Hydrogène
 Oxygen → Oxygène

Source: Areva, 2015.

Figure 1 Principes de fonctionnement de l'électrolyseur PEM

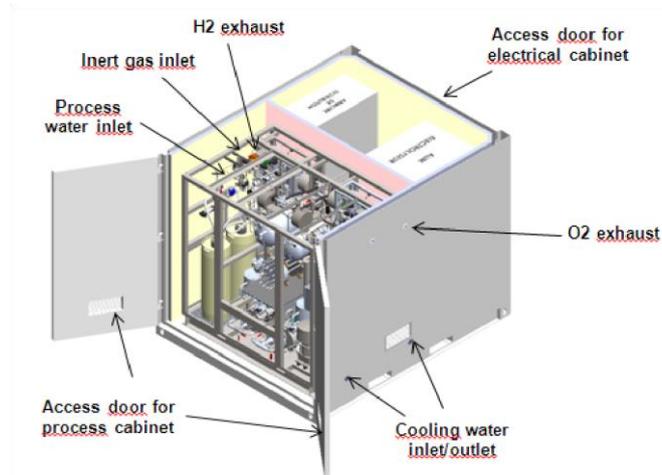
Les mécanismes de l'électrolyse de l'eau basés sur la membrane échangeuse de protons (PEM-Proton Exchange Membrane) sont présentés dans la Figure 1. Dans l'électrolyse de l'eau par PEM, l'eau est divisée électro-chimiquement, respectivement, en hydrogène à la cathode et en oxygène à l'anode. Pendant le fonctionnement de l'électrolyseur d'eau PEM, l'eau est pompée dans les canaux de l'anode où elle est divisée en oxygène, proton et électrons. Les protons traversent le PEM pris en sandwich entre l'anode et la cathode et arrivent du côté de la cathode. Les électrons voyagent de l'anode à la cathode à travers le circuit électrique externe, qui fournit la force motrice, c'est-à-dire la tension de la cellule, pour la réaction. À la cathode, les protons et les électrons se recombinent pour produire de l'hydrogène.

La formation d'une ATEX hydrogène-oxygène dans le séparateur peut être causée par un dysfonctionnement de la ligne de transfert d'eau ou par une perforation de la membrane. Les mesures de sécurité suivantes sont envisagées pour éviter la formation d'une ATEX dans le séparateur :

- Imposer un niveau d'eau minimal dans le séparateur de gaz supérieur à 55% de sa hauteur,
- Contrôler le niveau d'eau dans le séparateur de gaz d'O₂ et de H₂,
- Contrôler la pression et la différence de pression entre les lignes de O₂ et de H₂,

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

- Contrôler la concentration d'hydrogène à la sortie du séparateur de gaz d'oxygène.



Légende :

H₂ exhaust → Echappement Hydrogène

Inert gas inlet → Entrée de gaz inerte

Process water inlet → Entrée de l'eau de procédé

Access door for process cabinet → Porte d'accès pour l'armoire de traitement

Access for electrical cabinet → Accès à l'armoire électrique

O₂ exhaust → Echappement O₂

Cooling water inlet/outlet → Entrée/sortie d'eau de refroidissement

PEM (Proton Exchange Membrane) → Membrane Echangeuse de Protons

Figure 2 Schéma d'un électrolyseur PEM [1]

3.2 Stockage de l'hydrogène

Cette section fournit un aperçu des options de stockage d'hydrogène. Les fuites d'hydrogène, les feux et les explosions ainsi que les interactions de l'hydrogène avec les matériels utilisés pour le stockage sont extrêmement importantes et seront examinées dans les cours suivantes. Le stockage de l'hydrogène est une technologie favorable à toute une série d'applications de PCH, depuis le stockage embarqué dans les véhicules à pile à combustible jusqu'aux applications stationnaires à pile à combustible. Il n'existe pas de solution de stockage universelle qui puisse être installée sur tous les systèmes. Une solution de stockage d'hydrogène doit être sélectionnée pour convenir à une application spécifique. Par exemple, la taille et le poids sont des facteurs limitants pour les véhicules de tourisme, alors que le poids peut être un attribut souhaitable pour les chariots élévateurs. Les solutions de stockage sont un des principaux défis pour l'économie de l'hydrogène et ces technologies présentent un intérêt considérable pour la communauté scientifique et industrielle.

Le stockage de grandes quantités d'hydrogène pendant de longues périodes est une étape clé dans la mise en place de l'infrastructure PCH, qui régulera la consommation et la production d'hydrogène et assurera la continuité de son approvisionnement aux clients. Différents systèmes de stockage souterrain de l'hydrogène sont étudiés. Une option consiste à stocker l'hydrogène gazeux dans des formations géologiques telles que des gisements de gaz épuisés,

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

des aquifères ou des cavernes de sel. Une autre option est le stockage souterrain dans des réservoirs enfouis sous terre, et l'hydrogène est stocké soit sous forme de gaz comprimé, soit sous forme liquide. Le stockage géologique est généralement situé à proximité d'un site de production d'hydrogène, tandis que les réservoirs enterrés sont plus proches du point d'utilisation, par exemple des stations de ravitaillement.

De nombreuses technologies de stockage de l'hydrogène sont disponibles et peuvent être classées dans les groupes suivants :

- Stockage des gaz comprimés,
- Stockage liquéfié,
- Stockage solide.

La façon la plus courante de stocker l'hydrogène sous forme de gaz comprimé ou de liquide cryogénique est de le placer dans des cylindres ou des réservoirs en métal ou en matériau composite (Figure 3). La technologie de stockage cryo-comprimé, c'est-à-dire lorsque de l'hydrogène gazeux sous haute pression est refroidi à basse température, est une autre alternative. Les bouteilles peuvent avoir différentes tailles, capacités (de 20 à 300 L) et pressions (20-70 MPa) et, pour certaines applications, peuvent être reliées en un faisceau ou rassemblées sur un cadre pour le transport.

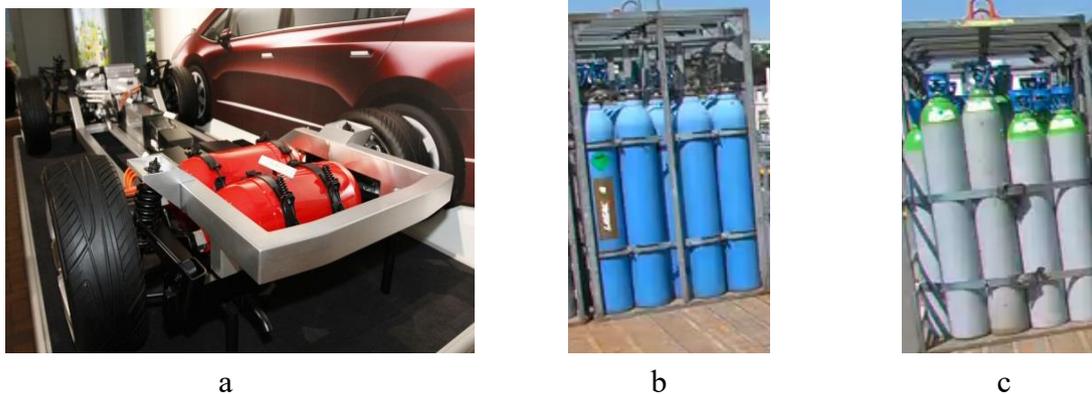


Figure 3 Stockage embarqué d'hydrogène (a), faisceau de cylindres (b) et cadre de cylindres pour le transport (c)

L'hydrogène gazeux peut être comprimé à 20-100 MPa. Les principaux problèmes liés au stockage de l'hydrogène sous forme de gaz comprimé sont la quantité d'énergie nécessaire au processus de compression, les problèmes de sécurité inhérents au stockage de l'hydrogène à des pressions aussi élevées et les coûts et poids supplémentaires des bouteilles conçues pour stocker l'hydrogène à des pressions élevées. Les problèmes tels que la perméation et la fragilisation sont proportionnels à la pression du gaz ; par conséquent, à des pressions plus élevées, ces problèmes peuvent être plus importants. En Europe, la plupart des bouteilles transportables ne sont équipées que d'une vanne comme dispositif de sécurité. Aux États-Unis, les bouteilles transportables sont équipées de dispositifs de décharge de pression. Cette prescription est très controversée car ils deviennent souvent la source de fuites. Le stockage de

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

l'hydrogène gazeux comprimé est généralement intégré aux systèmes de stockage d'hydrogène stationnaires et au stockage embarqué de l'hydrogène dans les véhicules à pile à combustible [1].

L'hydrogène cryogénique, qui se forme lorsqu'il est refroidi à une température inférieure à son point d'ébullition 20K (- 253 °C), est la deuxième grande catégorie de stockage de l'hydrogène. Sous cette forme, l'hydrogène peut être soit stocké pendant un certain temps, soit transporté. Cette option de stockage est également très coûteuse en raison de l'énergie considérable requise pour la liquéfaction. Il faut également tenir compte du coût et du poids des matériaux appropriés pour stocker et maintenir l'hydrogène à basse température.

L'hydrogène peut également être stocké soit à l'intérieur de la structure, soit à la surface de certains matériaux solides. Cette option de stockage ne nécessite pas de hautes pressions ni de basses températures comme dans les deux méthodes précédentes, ce qui présente des avantages en termes de sécurité des matériaux. Il existe trois principaux mécanismes de stockage de l'hydrogène dans les matériaux : l'absorption, l'adsorption (Figure 4a) et les réactions chimiques (Figure 4, b- d). Les exemples de matériaux et de composés convenant au stockage de l'hydrogène solide sont présentés ci-dessous Figure 4.

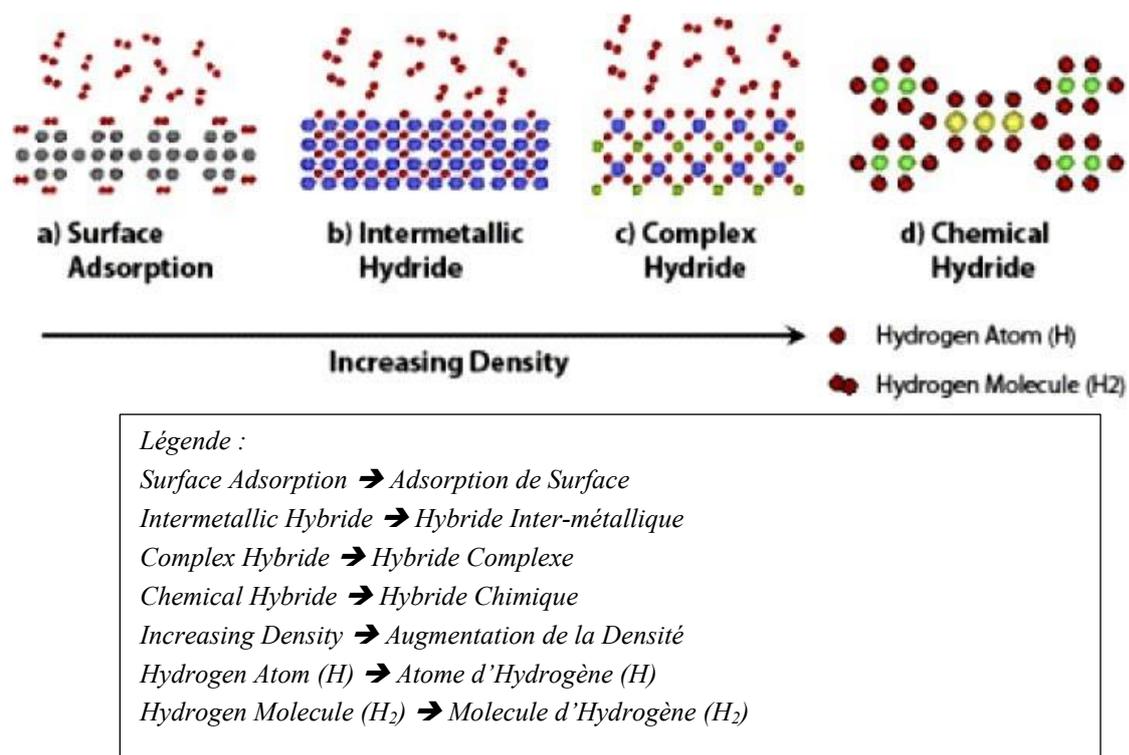


Figure 4 Matériaux utilisés comme stockage solide de l'hydrogène [2]

Ces trois options ont leurs propres avantages et inconvénients, les questions de sécurité sont également différentes et seront examinées en détail dans le cours 3 sur la "Sécurité du stockage de l'hydrogène". Les systèmes de stockage de l'hydrogène peuvent être utilisés à différentes fins : en tant que conteneurs pour le transport, en tant que systèmes de stockage stationnaires

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

sur site (sous le sol ou au-dessus du sol) ou en tant que réservoirs de stockage embarqués dans les véhicules de transport de marchandises.

3.3 L'usage de l'hydrogène dans l'industrie

L'hydrogène est utilisé dans l'industrie et stocké de manière sûre sous forme de gaz comprimé ou liquéfié depuis plus de 100 ans. L'hydrogène est largement utilisé pour toute une série d'applications, notamment : le raffinage du pétrole brut ; comme agent de refroidissement dans les turbines génératrices d'électricité ; comme agent propulseur dans la propulsion des fusées et les missiles ; pendant la production d'ammoniac pour les engrais ; dans la métallurgie pour extraire les métaux purs de leurs minerais ; dans les industries des semi-conducteurs, du verre, de la pharmacie, de la pétrochimie, de la chimie et de l'alimentaire ; etc. Les statistiques sur les incidents liés à l'hydrogène indiquent qu'actuellement les incidents survenant dans les laboratoires sont les plus fréquents (environ 32 %) [3]. Ce faible taux d'accidents peut s'expliquer par les mesures de sécurité strictes déjà en place pour la production et l'utilisation finale de l'hydrogène. Toutefois, cette tendance pourrait changer dans les années à venir en raison de l'expansion des applications de la PCH dans le domaine public et de l'utilisation plus fréquente des technologies de la PCH par des particuliers sans formation spéciale en matière de sécurité. Les rapports d'incidents montrent également que sur le nombre total d'incidents enregistrés jusqu'à présent, seule une petite proportion a entraîné la perte de vies humaines (4,6 %) [4]. Bien que les questions de sécurité de l'hydrogène aient été efficacement contrôlées dans l'industrie jusqu'à présent, des approches de sécurité supplémentaires, notamment en ce qui concerne les procédures d'intervention d'urgence, seront nécessaires tant dans le secteur des transports que sur les marchés résidentiels des carburants, principalement en raison des pressions élevées utilisées pour le stockage de l'hydrogène. L'hydrogène n'est ni plus ni moins dangereux que d'autres carburants inflammables, notamment l'essence et le gaz naturel. En fait, certaines de ses propriétés, comme la flottabilité, offrent des avantages en matière de sécurité par rapport aux autres carburants. Cependant, tous les combustibles inflammables doivent être manipulés de manière responsable. Comme l'essence et le gaz naturel, l'hydrogène est inflammable et peut se comporter dangereusement dans des conditions spécifiques. L'hydrogène peut être manipulé en toute sécurité si des directives simples sont respectées et si l'utilisateur possède un bon niveau de connaissance de son comportement unique. La compréhension des propriétés spécifiques de l'hydrogène et la connaissance des applications de la PCH permettent une utilisation sûre de l'hydrogène comme carburant. Il est nécessaire d'instaurer une nouvelle culture de la sécurité dans notre société, de développer des stratégies de sécurité innovantes et des solutions techniques révolutionnaires. On s'attend à ce que le niveau de sécurité à l'interface entre le consommateur et l'hydrogène soit similaire ou supérieur à celui qui existe pour l'utilisation des combustibles fossiles. Ainsi, les paramètres de sécurité des produits à base d'hydrogène et de piles à combustible définiront directement leur compétitivité sur le marché [5].

4. Véhicules à pile à combustible

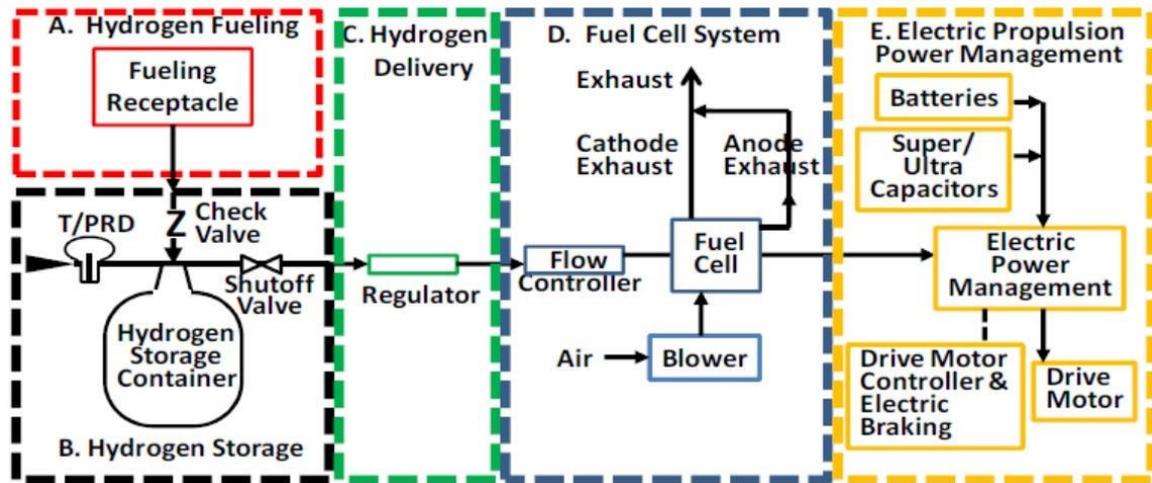
Les technologies PCH pour les véhicules routiers et les véhicules spécialisés revêtent aujourd'hui une grande importance. Certains constructeurs automobiles, comme Toyota, ont déjà lancé la vente de véhicules PCH dans les régions où l'infrastructure de ravitaillement est déjà en place. Les exemples de véhicules routiers comprennent les voitures particulières, les bus, les scooters, les camions légers, etc. Ils utilisent l'hydrogène comme carburant et n'ont pas de moteur, la Pile à Combustible et le moteur électrique étant utilisés à la place. La disponibilité de l'infrastructure est une étape clé pour le succès commercial de ces produits. En apparence, ces véhicules sont similaires aux véhicules conventionnels. Contrairement aux véhicules conventionnels, ils n'émettent pas de polluants et sont très silencieux pendant leur fonctionnement. Les véhicules spéciaux constituent une autre application importante. Les véhicules spécialisés sont conçus à des fins spécifiques et fonctionnent généralement en flottes. Les chariots élévateurs à fourche à Pile à Combustible sont un bon exemple de véhicules spécialisés. Ce type de véhicules nécessite une puissance de 1,5 à 10 kW. À l'heure actuelle, de nombreuses entreprises privées investissent dans une flotte de chariots élévateurs à fourche à Pile à Combustible et dans une infrastructure de ravitaillement, car elles bénéficient de leur utilisation presque immédiatement.

4.1 Les caractéristiques principales des véhicules à pile à combustible

Les voitures à Pile à Combustible (PC) ont une chaîne de traction électrique alimentée par une PAC qui produit de l'électricité par réaction électrochimique à partir d'hydrogène. Bien qu'il existe une grande variété de prototypes de voitures PC, les caractéristiques clés suivantes (Figure 5) sont communes à la plupart d'entre eux [6] :

- Système de ravitaillement en hydrogène,
- Système de stockage d'hydrogène,
- Système Pile à Combustible,
- Propulsion électrique et système de gestion de la puissance.

Pendant le ravitaillement, l'hydrogène est fourni à la voiture par le réceptacle de ravitaillement (A) et s'écoule vers le système de stockage de l'hydrogène (B). L'hydrogène fourni et stocké dans le système de stockage de l'hydrogène, généralement sous forme gazeuse comprimée. Lorsqu'une voiture à pile à combustible démarre, de l'hydrogène gazeux est libéré du système de stockage. Les régulateurs de pression et autres équipements du système de distribution d'hydrogène (C) réduisent la pression au niveau approprié pour le fonctionnement du véhicule électrique. L'hydrogène est combiné électro-chimiquement avec de l'oxygène dans le système à pile à combustible (D) pour produire de l'énergie électrique à haute tension. Cette énergie électrique est fournie au système de gestion de l'énergie de propulsion électrique (E) où elle est utilisée pour alimenter les moteurs d'entraînement électriques ou charger les batteries et les condensateurs.



Légende :

Hydrogen Fuelling → Ravitaillement en Hydrogène

Fuelling Receptacle → Réceptacle de Remplissage

Check Valve → Clapet Anti-retour

T/PRD (thermally activated pressure relief device) → dispositif de décompression thermique

Hydrogen Storage Container → Conteneur de stockage d'hydrogène

Hydrogen Storage → Stockage d'Hydrogène

Hydrogen Delivery → Distribution d'hydrogène

Regulator → Régulateur

Fuel Cell System → Système de pile à combustible

Exhaust → Echappement

Cathode Exhaust → Echappement de la cathode

Anode Exhaust → Echappement de l'anode

Flow Controller → contrôleur de débit

Fuel Cell → Pile à combustible

Blower → Ventilateur

Electric Propulsion Power Management → Gestion de la puissance de la propulsion électrique

Batteries → Batteries

Super/Ultra Capacitors → Super/Ultra Condensateurs

Electric Power Management → Gestion de la puissance électrique

Drive Motor Controller & Electric Braking → Contrôleur de moteur d'entraînement et freinage électrique

Figure 5 Les systèmes clés d'une voiture à Pile à Combustible [6]

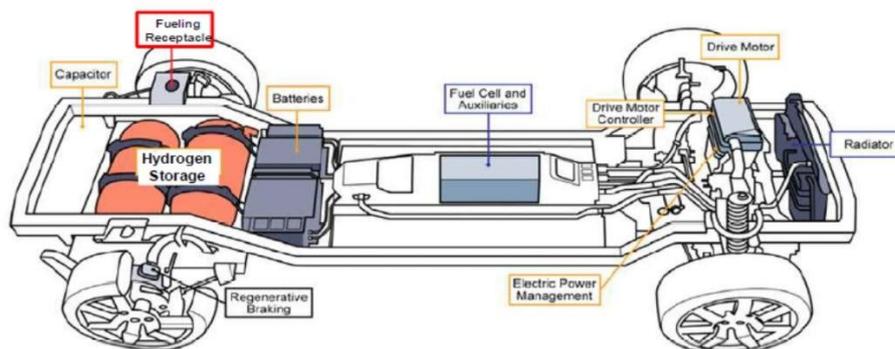
4.2 Voitures à pile à combustible

La Figure 6 illustre la disposition typique des principaux composants d'une voiture à pile à combustible type [6]. Le réceptacle de ravitaillement est placé sur le panneau arrière de la voiture comme sur les autres véhicules courants. Comme pour les réservoirs d'essence, les réservoirs de stockage d'hydrogène sont généralement montés transversalement à l'arrière de la voiture, mais ils peuvent aussi être montés différemment, par exemple dans le sens de la longueur dans le tunnel central de la voiture. Les piles à combustible et les accessoires sont généralement situés sous l'habitacle avec la gestion de l'énergie, le contrôleur du moteur

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

d'entraînement et les moteurs d'entraînement. Compte tenu de la taille et du poids des batteries de traction et des ultra-condensateurs, ces composants sont généralement situés dans la voiture afin de conserver l'équilibre de poids souhaité pour une bonne maniabilité de la voiture.

L'hydrogène peut être fourni à la voiture dans une station de ravitaillement. À l'heure actuelle, l'hydrogène est le plus souvent distribué aux voitures sous forme de gaz comprimé, pressurisé jusqu'à 125 % de la pression de service nominale (Nominal Working Pressure - NWP) de la voiture afin de compenser le réchauffement transitoire dû à la compression adiabatique pendant le ravitaillement.



Légende :

Fuelling receptacle → Réceptacle de ravitaillement

Batteries → Batteries

Capacitor → Condensateur

Fuel Cell and Auxiliaries → Pile à combustible et auxiliaires

Drive motor → Moteur de traction

Radiator → Radiateur

Regenerative braking → Freinage par régénération

Hydrogen storage → Stockage d'hydrogène

Drive motor controller → Contrôleur du moteur d'entraînement

Electric Power Management → Gestion de puissance électrique

Figure 6 Un exemple de voiture à Pile à combustible [6]

4.2.1 Système de stockage d'hydrogène

Les principales fonctions du système de stockage de l'hydrogène sont de recevoir de l'hydrogène pendant le ravitaillement, de le contenir jusqu'à ce qu'il soit nécessaire, puis de libérer de l'hydrogène dans le système de pile à combustible pour alimenter la voiture. Actuellement, la méthode la plus courante de stockage et de livraison d'hydrogène en tant que carburant est sous forme de gaz comprimé. Les bouteilles de gaz comprimé légères à 700 bars sont développées pour augmenter la capacité de stockage. Elles sont constituées d'un liner métallique (type III) ou polymère (type IV) placé dans une structure composite renforcée de fibres (Figure 7). Les travaux se poursuivent pour réduire les coûts de ces cylindres. De plus amples informations relatives aux systèmes de stockage d'hydrogène embarqués seront disponibles dans les cours suivants.

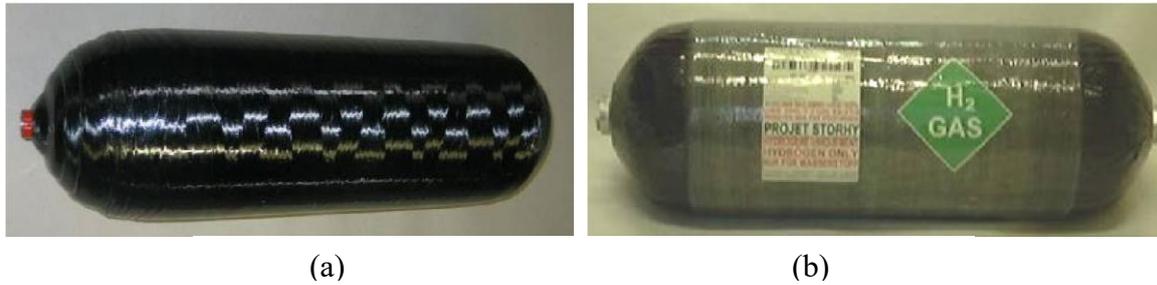


Figure 7 Prototypes de cylindres de 700 bar développés et testés dans le cadre du projet européen STORHY : (a) technologie de type III, (b) technologie de type IV

4.2.2 Système d'alimentation en carburant hydrogène

Le système d'alimentation en hydrogène, en tant que carburant, transfère l'hydrogène depuis le système de stockage vers le système de propulsion à la bonne pression et température pour que la pile à combustible fonctionne. Ce résultat est obtenu grâce à une série de vannes de contrôle du débit, de régulateurs de pression, de filtres, de conduites de carburant (tuyaux) et d'échangeurs de chaleur. La plupart des conduites de carburant sont de couleur argentée, mais parfois elles peuvent être rouges. Si le réservoir est fermé en raison d'un incident, seule une petite quantité d'hydrogène se trouvera dans ces conduites. Cependant, les premiers intervenants ne doivent pas couper les conduites de carburant pendant les procédures de désincarcération.

4.2.3 Système pile à combustible

Le système à pile à combustible produit l'électricité nécessaire au fonctionnement des moteurs d'entraînement et à la charge des batteries et/ou des condensateurs du véhicule. Il existe plusieurs types de piles à combustible, mais les piles PEM sont le type le plus couramment utilisé dans les applications automobiles en raison de leur température de fonctionnement plus basse, qui permet des temps de démarrage plus courts. Les piles à combustible PEM combinent électro-chimiquement l'hydrogène et l'oxygène pour générer de l'énergie électrique. Les piles à combustible sont capables de produire de l'électricité en continu lorsqu'elles sont alimentées en hydrogène et en oxygène, générant simultanément de l'électricité et de l'eau sans produire de dioxyde de carbone (CO₂) ou d'autres émissions nocives typiques des moteurs à combustion interne à essence ou diesel. En général, les piles à combustible d'un véhicule de tourisme léger génèrent une tension d'environ 400 V DC. Un convertisseur relie également la pile à combustible à la batterie haute tension. La température de fonctionnement de la pile à combustible est beaucoup plus basse que celle du moteur à combustion interne, car elle est plus efficace.

4.2.4 Propulsion électrique et système de gestion de la puissance

L'énergie électrique générée par le système à pile à combustible (empilement de piles à combustible) est utilisée pour entraîner les moteurs électriques qui propulsent le véhicule ainsi que pour alimenter un moteur de pompe à air et un moteur de climatisation. De nombreuses voitures particulières à système pile à combustible sont à traction avant, le moteur électrique

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

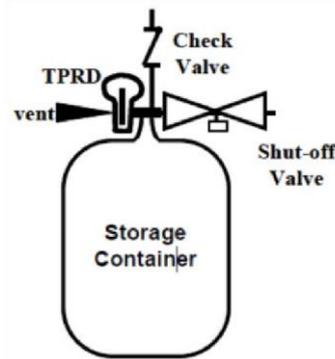
et le groupe motopropulseur étant situés dans le "compartiment moteur" montés transversalement au-dessus de l'essieu avant. Toutefois, d'autres configurations et la traction arrière sont également des options viables. Les voitures pile à combustible de type SUV de plus grande taille peuvent être à traction intégrale avec des moteurs électriques sur les essieux avant et arrière ou avec un moteur sur chaque roue. Le pack batterie de haute tension est habituellement dans un boîtier métallique et est fermement monté dans un cadre. Différents véhicules à pile à combustible utilisent différentes sortes de batteries telles que les hybrides nickel-métal ou lithium-ion. Les autres composants haute tension peuvent comprendre un contacteur de la pile à combustible, une unité de contrôle de la tension de la batterie, un convertisseur CC-CC (ou DC-DC pour Direct Current- Direct Current), une unité d'entraînement de puissance et un chauffage électrique. L'électricité provenant de la pile à cellules à combustible et de la batterie haute tension est fournie aux moteurs par un certain nombre de câbles, qui sont généralement situés à l'intérieur ou derrière les composants haute tension fermés et sous le véhicule. Ils sont facilement identifiables grâce à leur gaine de protection orange.

4.2.5 Caractéristiques et concepts de sécurité

Les voitures à pile à combustible sont ravitaillées par un pistolet spécial situé sur le distributeur de carburant d'une station de ravitaillement, qui se connecte au réceptacle de ravitaillement de la voiture pour assurer un transfert d'hydrogène en "système fermé" vers la voiture. Le réceptacle de ravitaillement de la voiture à pile à combustible contient un clapet anti-retour ou un autre dispositif qui empêche la fuite d'hydrogène hors de la voiture lorsque le pistolet de ravitaillement est déconnecté.

Les composants d'un système de stockage d'hydrogène comprimé type sont illustrés à la Figure 8. Le système comprend le réservoir et tous les autres composants qui forment " l'enveloppe de pression primaire " qui empêche l'hydrogène de s'échapper du système. Trois dispositifs de sécurité font partie du système de stockage d'hydrogène comprimé :

- Un clapet anti-retour,
- Une vanne d'arrêt,
- Un dispositif de décompression activé thermiquement (Thermally activated Pressure Relief Device - TPRD).



Légende :

TPRD → Thermal-activated Pressure Relief Device = Dispositif de décompression activé thermiquement

Check Valve → Vanne anti-retour

Shut-off Valve → Vanne d'arrêt

Storage Container → Réservoir de stockage

Figure 8 Un système de stockage d'hydrogène comprimé type [6]

Pendant le ravitaillement, l'hydrogène entre dans le système de stockage par un clapet anti-retour. Ce clapet empêche le reflux d'hydrogène dans les conduites de ravitaillement. Une vanne d'arrêt d'hydrogène automatisée empêche l'écoulement de l'hydrogène stocké lorsque la voiture ne fonctionne pas ou lorsqu'un défaut est détecté et nécessite l'isolement du système de stockage d'hydrogène. En cas d'incendie, des dispositifs de décompression activés thermiquement (TPRD – Thermally activated Pressure Relief Device) assurent une libération contrôlée du gaz des réservoirs de stockage d'hydrogène comprimé avant que les températures élevées de l'incendie n'affaiblissent les parois des réservoirs et ne provoquent leur rupture dangereuse. Les TPRD sont conçus pour évacuer rapidement la totalité du contenu du conteneur. Ils ne se referment pas et ne permettent pas la re-pressurisation du conteneur. Les conteneurs de stockage et les TPRD qui ont été soumis à un incendie sont censés être retirés du service et détruits. L'hydrogène est généralement (mais pas toujours) évacué à l'extérieur du véhicule à pile à combustible par une conduite d'évacuation. L'emplacement exact de ces conduites d'aération dépend du constructeur du véhicule et de son modèle, mais il se trouve généralement à l'arrière du véhicule, près du réservoir d'hydrogène [6]. Le système d'alimentation en carburant doit réduire la pression des niveaux du système de stockage de l'hydrogène aux valeurs requises par le système de pile à combustible. Dans le cas d'un système de stockage d'hydrogène comprimé de 70 MPa NWP (Nominal Working Pressure – Pression Nominale de Fonctionnement), par exemple, la pression peut devoir être réduite d'un niveau aussi élevé que 87,5 MPa à moins de 1 MPa à l'entrée du système de pile à combustible. Cela peut nécessiter plusieurs étapes de régulation de la pression pour obtenir un contrôle précis et stable et une protection contre la surpression des équipements en aval en cas de défaillance du régulateur de pression. La protection contre la surpression du système d'alimentation en

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

combustible peut être réalisée en évacuant l'excès d'hydrogène gazeux par des soupapes de décharge ou en isolant l'alimentation en hydrogène gazeux (en fermant la vanne d'arrêt du système de stockage d'hydrogène) lorsqu'une surpression en aval est détectée [6]. Un certain nombre de capteurs d'hydrogène sont situés dans les véhicules à pile à combustible. Lorsqu'une fuite d'hydrogène potentiellement dangereuse est détectée, le contrôleur du système arrête automatiquement le débit d'hydrogène du réservoir. Les capteurs peuvent se trouver à plusieurs endroits : sur le tableau de bord, à côté des réservoirs d'hydrogène, près d'un tuyau d'échappement, sous le capot, au-dessus de la garniture de toit dans l'habitacle, etc. Lorsque le système de propulsion est allumé, ces capteurs surveillent en permanence la concentration d'hydrogène dans ces zones. Par exemple, selon la **procédure opérationnelles normalisées** (PON) des premiers intervenants américains, lorsque de l'hydrogène est détecté à un "niveau d'avertissement", le conducteur est alerté par l'icône "H₂" située sur le tableau de bord et le centre d'information du conducteur (**Driver's Information Centre** - DIC) affiche un message "H₂ détecté". Si l'hydrogène est détecté à un "niveau d'alarme", l'icône "H₂" clignote, un bip sonore retentit et le message "H₂ détecté - Évacuer le véhicule" apparaît sur le DIC [7]. Il convient de noter que différentes normes de différents niveaux de danger ont été appliquées dans différents pays, bien que les procédures opérationnelles normalisées générales soient similaires. Des concentrations d'hydrogène différentes déclenchent des niveaux d'alerte différents selon les pays.

4.3 Bus à pile à combustible

Les bus à pile à combustible utilisent la même technologie que les voitures à pile à combustible. L'hydrogène est stocké dans des réservoirs généralement situés sur le toit du bus. La capacité totale est de l'ordre de 40 kilogrammes. La pile à combustible est située dans le compartiment moteur arrière. La pile à combustible du bus est plus grande que celle de la voiture à pile à combustible et génère une tension plus élevée, d'environ 600 V. Les principaux avantages des bus à pile à combustible par rapport aux bus conventionnels sont la réduction de la pollution, la diminution de la concentration des gaz à effet de serre, l'augmentation de l'efficacité énergétique et un fonctionnement plus silencieux. Il existe une série de projets européens associés à un transport basé sur l'hydrogène. Par exemple, le Clean Energy Partnership (CEP) [8] est le projet qui vise à tester et à démontrer l'utilisation des technologies PCH dans les applications de transport. Le CEP, créé en 2002, est une coopération internationale de 18 partenaires, dont les principaux constructeurs automobiles tels que BMW Group, Honda, Daimler, Ford, Hyundai, GM/Opel, Toyota et Volkswagen. En 2011, le CEP est passé à sa troisième phase, la "préparation du marché". Un autre projet est HyFLEET : CUTE, qui vise à développer et à exploiter la plus grande flotte de bus à pile à combustible du monde. Le projet HyFLEET : CUTE a permis l'exploitation de 47 bus à hydrogène en service de transport public régulier dans 10 villes sur trois continents (Amsterdam, Barcelone, Pékin, Hambourg, Londres, Luxembourg, Madrid, Perth, Reykjavík) [9]. Ces bus ont permis de fournir des données précieuses aux développeurs et aux opérateurs, car ils sont utilisés dans des conditions

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

difficiles, grâce à un fonctionnement ininterrompu et faisant parfois face à des conditions climatiques extrêmes. Un autre aspect important de ce projet a été de familiariser le public avec cette nouvelle technologie et d'obtenir ainsi son acceptation par le public [9]. Londres dispose désormais d'une flotte de 8 autobus à pile à combustible circulant sur la ligne RV1 entre Covent Garden et Tower Gateway (Figure 9). Un projet de six ans de l'entreprise commune FCH JU (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking), JIVE (Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe), lancé à partir de janvier 2017 cherche à déployer 139 nouveaux bus à pile à combustible zéro émission et les infrastructures de ravitaillement associées dans cinq pays. Un projet suivant, JIVE2, démarré en janvier 2018, combiné au projet JIVE, permettra de déployer près de 300 bus à pile à combustible dans 22 villes d'Europe d'ici le début des années 2020 - le plus grand déploiement en Europe à ce jour. (<https://www.fuelcellbuses.eu/public-transport-hydrogen/jivejive2mehrlin-leaflet>)



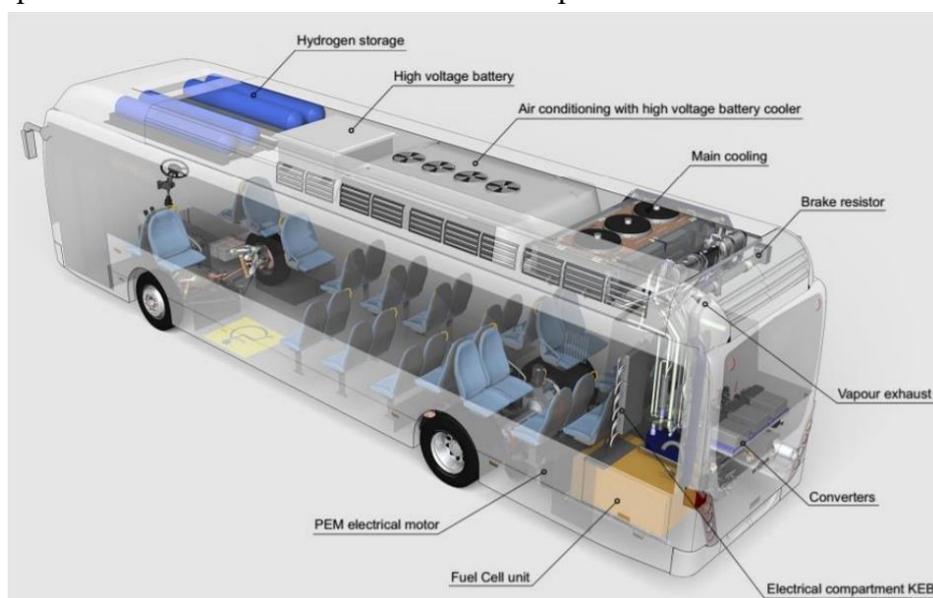
Figure 9 Le bus à hydrogène Wright Pulsar 2 sur la ligne RV1 à Londres

"Les bus à pile à combustible ont beaucoup évolué au cours des dernières décennies. Un certain nombre de configurations différentes ont été utilisées, notamment l'hydrogène dans le moteur à combustion interne et diverses technologies de piles à combustible. En outre, les entreprises ont utilisé des systèmes d'entraînement direct et des systèmes d'entraînement hybrides, dans lesquels un dispositif de stockage d'énergie (batterie ou ultra-condensateur) est inclus dans la chaîne cinématique pour réduire les charges de pointe et permettre le freinage par récupération" [10]. Une brève comparaison entre les principales technologies de bus à hydrogène est présentée dans l'étude réalisée dans le cadre du projet NextHyLights [10]. La Figure 10 montre la disposition du bus à pile à combustible "All American" de SunLine [11]. Dans cet exemple, l'hydrogène est stocké sous forme de gaz comprimé (CGH₂). Adams [11] a effectué une recherche sur la pression optimale de stockage à bord qui serait nécessaire pour les bus équipés de réservoirs CGH₂. Il a conclu qu'un dispositif standardisé de restriction de la pression de stockage à bord est nécessaire pour garantir qu'un véhicule ne soit pas rechargé à une pression supérieure à la pression de stockage pour laquelle il a été conçu. Cette normalisation est également nécessaire pour réduire les coûts inutiles de développement du système pour les véhicules et l'infrastructure de ravitaillement associée, ainsi que pour réduire le risque

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

d'endommager les interfaces de ravitaillement en raison de leur incompatibilité. L'énergie de compression du gaz dans un réservoir augmente pour une masse donnée d'hydrogène avec l'augmentation de la pression de stockage ; par conséquent, une expansion soudaine du gaz due à la rupture du réservoir pourrait avoir des conséquences graves qui augmenteraient avec l'augmentation des pressions. C'est pourquoi, lorsque l'on envisage des systèmes de stockage pour les autobus, où le volume n'est pas une contrainte aussi importante que pour les voitures, on a constaté que les pressions optimales pour les autobus urbains non articulés à un seul étage se situaient entre 20 et 35 MPa [12].

Les dispositifs de sécurité utilisés dans les bus à pile à combustible sont similaires à ceux utilisés dans les voitures à pile à combustible. Le dispositif de décompression (PRD - Pressure Relief Device) est un dispositif non refermable activé thermiquement qui est conçu pour protéger un réservoir d'hydrogène sous pression contre une défaillance catastrophique en cas de situation d'urgence telle qu'un incendie. Il est utilisé pour garantir que l'impact thermique causé par les flammes n'augmente pas la pression dans le réservoir de stockage au-delà de sa capacité structurelle. Il convient toutefois de noter que les incendies qui provoquent l'ouverture d'un dispositif de décompression peuvent ne pas entraîner l'inflammation immédiate de l'hydrogène lors de sa libération. Les réservoirs d'hydrogène sont équipés de dispositifs de décompression activés thermiquement (TPRD - Thermally activated Pressure Relief Device) et de conduites de carburant et de ventilation en acier inoxydable. Il y a un bouton d'arrêt d'urgence (ESD - Emergency Shut-down Device) situé sur le panneau du conducteur, et un autre sur la pile à combustible elle-même dans le compartiment moteur.



Légende :

PEM electrical motor – Moteur électrique PEM

Fuel Cell Unit – Unité de la pile à combustible

High voltage battery – Batterie haute tension

Converters - Convertisseur

Air conditioning with high voltage battery cooler - Climatisation avec refroidisseur de batterie haute tension

Main cooling – Refroidissement principal

Brake resistor – Résistance de freinage

Vapour exhaust – échappement des vapeurs

Hydrogen storage – Stockage de l'hydrogène

Figure 10 Une disposition des principaux composants d'un bus à pile à combustible [11]

Les premiers intervenants doivent apprendre à gérer les véhicules à pile à combustible en cas d'accident de la circulation. Les principaux dangers sont liés à une tension élevée (jusqu'à 600 V) et à des pressions de gaz élevées (jusqu'à 70 MPa). Pour les différents types de véhicules routiers, le règlement CE79/2009 en conjonction avec le règlement CE406/2010 exige l'étiquetage des véhicules à courant alternatif : pour les véhicules légers, l'étiquette doit être placée de manière visible près du réceptacle de carburant (une autre étiquette doit se trouver dans le compartiment moteur). Des travaux sont en cours pour mettre à jour les directives dans ce domaine et il est conseillé aux intervenants de confirmer les exigences en matière d'étiquetage, par exemple auprès du groupe de travail 13 de la CEE-ONU. (<https://unece.org/wp29-introduction>).

Des fiches de données de sauvetage doivent être disponibles pour tous les véhicules à pile à combustible et doivent se trouver à bord du véhicule. Idéalement, les pompiers auront accès à ces informations par le biais de liaisons de communication. Toutefois, il est à noter que les niveaux d'accès varient considérablement et que cela n'est pas toujours possible. Les paramètres d'identification du véhicule devraient également contenir toutes les caractéristiques de haute tension et de haute pression, ce qui permettrait d'informer les premiers intervenants bien à l'avance. Comme pour les véhicules à carburant conventionnel, les composants suivants peuvent présenter des risques pour les premiers intervenants en cas d'accident de la route : pare-chocs, amortisseurs, pneus, entretoises de capot et de coffre, airbags, prétensionneurs de ceinture de sécurité, système de climatisation, batteries. Veuillez noter que la déconnexion d'un câble basse tension isolera et arrêtera tous les systèmes du véhicule (par exemple, le stockage d'hydrogène, les systèmes haute tension et basse tension) dans un véhicule à pile à combustible.

4.4 Chariot élévateur à pile à combustible

De nombreuses entreprises possédant de grands entrepôts ou des centres de distribution utilisent actuellement des chariots élévateurs à fourche à courant continu pour déplacer les marchandises, qui fonctionnent 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7 [1]. Les chariots élévateurs à fourche sont des véhicules hybrides qui couplent une pile à combustible, généralement de 1,5 à 10 kW avec une batterie. Les cadres d'hydrogène sont stockés à l'extérieur de l'établissement/entrepôt. L'hydrogène est soit livré sur le site par un fournisseur de gaz industriel, soit produit sur place par reformage du gaz naturel ou par électrolyse de l'eau. Le ravitaillement en hydrogène d'un chariot élévateur à fourche à pile à combustible se fait généralement à l'intérieur (mais des distributeurs extérieurs sont également possibles) et ne prend que quelques minutes. Par rapport aux véhicules spécialisés alimentés par batterie, les chariots élévateurs à fourche à courant continu ont une durée de vie plus longue, disposent d'une plus grande puissance pendant une plus longue période et peuvent être ravitaillés en moins de 3 minutes. Un autre avantage des chariots élévateurs à fourche à courant continu est

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

la réduction des coûts d'exploitation et l'augmentation de la productivité grâce à la diminution du nombre de trajets vers une station de recharge de la batterie. Puisqu'il n'y a pas besoin de chargeurs de batterie, de zones de stockage ou d'échange de batterie, l'espace de l'entrepôt est disponible pour d'autres utilisations. Les principaux fournisseurs industriels vendent des stations de ravitaillement en hydrogène dans les entrepôts pour les chariots élévateurs à fourche à pile à combustible. La Figure 11 présente un exemple de chariot élévateur à fourche et de pile à combustible.



Chariot élévateur à fourche à pile à combustible



Unité à pile à combustible

Figure 11 Un chariot élévateur à fourche à pile à combustible et son unité à pile à combustible [1]

Les principaux composants d'une unité de pile à combustible sont présentés sur la Figure 12. Ils comprennent :

- Une pile à combustible (appelée PAC),
- Les auxiliaires de la pile à combustible,
- Un réservoir de stockage d'hydrogène, dont le volume varie entre 20 et 70 L dans l'eau et équipé d'un système de régulation,
- Une batterie lithium-ion, qui a passé avec succès les tests exigés par l'Organisation des Nations Unies (ONU), spécifiés dans le Manuel d'épreuves et de critères des Nations Unies, section 38.3,
- Le réservoir de collecte d'eau.

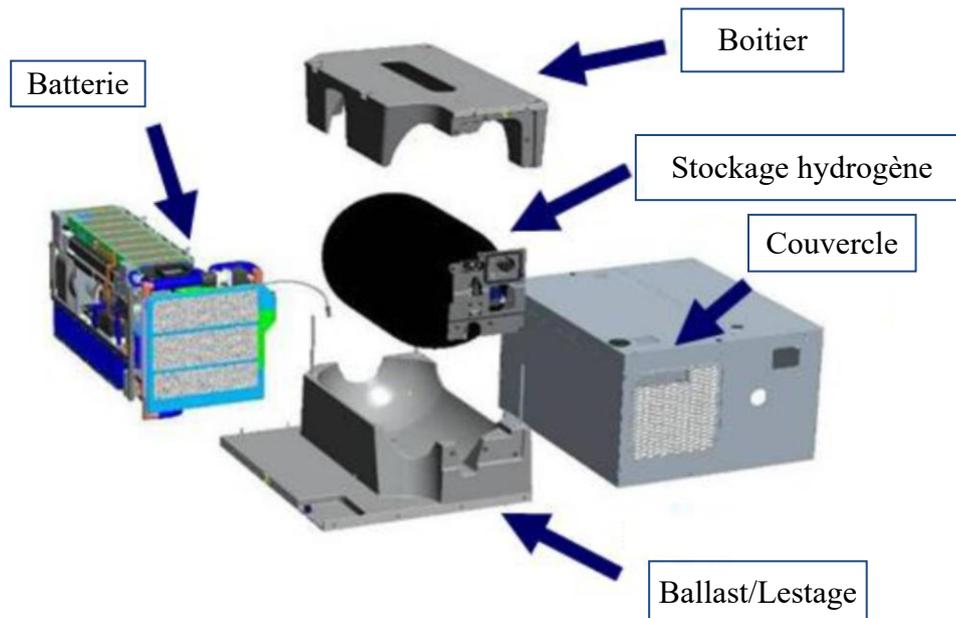


Figure 12 Composants de l'unité de piles à combustible pour chariots élévateurs

Du point de vue de la sécurité, le stockage d'hydrogène est protégé par un TPRD (déclenché par un fusible thermique) situé entre la vanne d'isolement du chariot élévateur et la bouteille. Le fusible s'ouvre à 109°C et permet la libération rapide de l'hydrogène sous pression. Il existe également un clapet anti-retour sur l'orifice de remplissage pour éviter que le gaz contenu dans le stockage ne s'échappe. Tous les composants de la pile à combustible sont intégrés dans un boîtier en fonte, lui-même protégé par un couvercle. Ce boîtier en fonte présente deux avantages : il offre une protection contre les dommages mécaniques externes et permet d'évacuer le flux d'hydrogène en cas d'attaque thermique externe.

4.5 Aviation

L'étude de l'utilisation de l'hydrogène comme carburant dans les avions a commencé en 1956. Les États-Unis ont réussi à faire voler un avion Canberra B57 dont l'un des moteurs utilisait de l'hydrogène sous pression avec de l'hélium [13]. Après le B57, les Soviétiques ont testé en 1988 la conversion expérimentale d'un Tu-154 de première production dont l'un des moteurs fonctionnait à l'hydrogène. Le moteur fonctionnant à l'hydrogène liquide a été testé à des hauteurs allant jusqu'à 7000 m et a accéléré à 900 km/h. Malheureusement, le programme d'hydrogène liquide (LH₂) n'a été réduit qu'à cinq vols et il a été décidé de ne pas continuer avec ces carburants en raison des coûts élevés et du manque d'infrastructures pour l'hydrogène [14]. Jusqu'à aujourd'hui, de nombreux prototypes d'avions à hydrogène tels que le Tupolev Tu-155 (Tupolev, 2009), l'Antares DLR-H2 (Fuel Cell Works, 2009), le Boeing Phantom Eye (Jackson et Haddox, 2010) et l'ENFICA-FC Rapid 200-FC (Commission européenne, 2011) ont été construits en utilisant des méthodes de stockage par compression et liquéfaction [15]. L'échelle de temps historique du développement des aéronefs propulsés par l'hydrogène liquide et les piles à combustible est illustrée à la Figure 13. En septembre 2016, le premier avion de

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

passagers à quatre places alimenté par une pile à combustible à hydrogène au monde, HY4, a effectué son premier vol depuis l'aéroport de Stuttgart. Dans ce futur taxi électrique, le carburant hydrogène est stocké à une pression comprise entre 4 300 PSI et 5 800 PSI dans deux réservoirs en fibre de carbone qui sont tous deux situés dans les deux fuselages. Dans cet avion dont la vitesse maximale est de 200 km/h, la pile à combustible convertit directement l'hydrogène en électricité et le seul déchet qui ressort de ce processus est l'eau [16]. Le 21 septembre 2020, Airbus a dévoilé trois concepts pour le premier avion commercial à zéro émission au monde, qui pourrait entrer en service d'ici 2035. Ces concepts représentent chacun une approche différente pour parvenir à un vol à zéro émission, explorant diverses voies technologiques et configurations aérodynamiques afin de soutenir l'ambition de l'entreprise de montrer la voie de la décarbonisation de l'ensemble de l'industrie aéronautique. Tous ces concepts reposent sur l'hydrogène comme source d'énergie primaire - une option qui, selon Airbus, est exceptionnellement prometteuse en tant que carburant aéronautique propre et est susceptible d'être une solution pour l'aérospatiale et de nombreuses autres industries pour atteindre leurs objectifs de neutralité climatique.

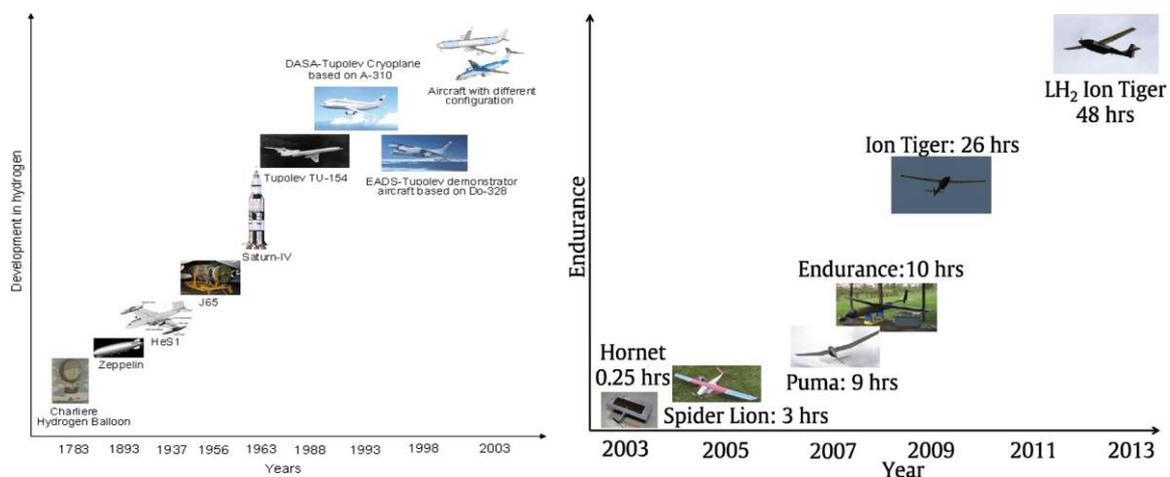


Figure 13 Chronologie du développement des avions propulsés par l'hydrogène (à gauche) et les piles à combustible (à droite)

Un avion a une masse maximale au décollage pouvant atteindre 640 tonnes. Pour transporter ces charges, des moteurs puissants et de grande taille sont nécessaires, et ces moteurs ont besoin de beaucoup de carburant. Ce besoin en carburant présente des avantages et des défis liés à la sécurité du carburant, à son coût, à l'énergie spécifique et à l'efficacité énergétique équivalente. Aujourd'hui, les aéronefs utilisent principalement des carburants dérivés du pétrole, obtenus à partir de combustibles fossiles. Parmi ces carburants, le coût du kérosène, le plus couramment utilisé, est inférieur à celui des autres carburants [15], [17]. Bien que le kérosène et certains mélanges d'essence étaient préférables comme carburant pour l'aviation, leurs réserves sont limitées et l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre a un impact négatif sur

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

l'environnement. Compte tenu de ces considérations, les chercheurs et les fabricants envisagent de nouveaux moyens et de nouvelles formes de traitement de l'énergie avec des carburants alternatifs/renouvelables.

C'est pourquoi les carburants fossiles conventionnels utilisés dans l'aviation sont remplacés par des carburants alternatifs. L'hydrogène est l'un des éléments les plus importants de la famille des carburants. Ces dernières années, l'hydrogène est devenu le centre d'intérêt des chercheurs et des experts en combustion en raison de sa disponibilité, de ses meilleures propriétés énergétiques spécifiques et de ses avantages environnementaux.

L'hydrogène est généralement utilisé dans les avions de deux manières : soit comme carburant à la place du kérosène dans les gros avions, soit comme carburant dans les piles à combustible PEM dans les petits avions à hélice [15].

5. Transport d'hydrogène

Comme vous l'avez appris, l'hydrogène a été utilisé dans l'industrie pendant de nombreuses décennies. Une fois que l'hydrogène est produit sur un site de production centralisé, il est généralement transporté vers les utilisateurs finaux ou vers les applications de pile à combustible concernées. L'hydrogène peut être transporté soit sous forme de gaz comprimé, soit sous forme de liquide cryogénique. Il existe donc un certain nombre de voies pour son transport en vrac : par la route dans des camions/remorques et des conteneurs ou par des tuyaux.

5.1 Poids lourds (PL)

5.1.1 Camions à gaz

Des flottes de camions sont actuellement utilisées par les entreprises de gaz industriels pour transporter des réservoirs en acier sans soudure d'hydrogène gazeux comprimé (CGH₂) sur des distances de 200 à 300 km depuis un site de production centralisé. Des bouteilles monocylindriques, des cadres comprenant plusieurs bouteilles ou de longs tubes cylindriques sont installés sur des remorques (tube trailer) (Figure 14). La pression de stockage varie de 200 à 300 bars et une remorque peut transporter de 2 000 à 6 200 Nm³ de CGH₂ pour les camions, sous réserve d'une limitation de poids à 40 tonnes. La quantité d'hydrogène transportée de cette manière est relativement faible (de 180 à 540 kg selon le nombre de tubes ou de faisceaux), ce qui représente environ 1 à 2 % de la masse totale du camion. Les remorques actuelles utilisent des bouteilles de stockage de type I (c'est-à-dire entièrement métalliques). Pour améliorer leurs performances, il est possible d'utiliser des faisceaux de cylindres ou de tubes enveloppés de frettes composites légères (type II). Ce mode de livraison est relativement facile mais il doit être adapté aux quantités d'hydrogène et aux distances pour être compétitif en termes de coûts. Les principales restrictions de la livraison par camion de gaz comprimé sont les coûts d'investissement, l'exploitation et la maintenance, y compris la main-d'œuvre des chauffeurs, et les coûts du carburant.



Source: AirLiquide, 2014.

Figure 14 Deux types de remorques CGH₂ exploitées par AirLiquide en Europe : (a) remorque à tubes transportant 2 000 à 3 000 Nm³ d'hydrogène et (b) remorque à bouteilles composites transportant 6 200 Nm³ d'hydrogène.

Le transport par camion gazeux (remorque à tubes, bouteilles) est l'un des modes les plus matures choisis pour le transport sur de courtes distances et pour de petites quantités d'hydrogène. Les principales limitations sont la faible capacité de stockage en poids pour les clients ayant des consommations élevées (nécessitant des livraisons fréquentes) et la faible pression de l'hydrogène livré, qui nécessite une compression supplémentaire, par exemple dans une station de ravitaillement. Ainsi, des technologies alternatives avec une pression plus élevée, une plus grande capacité de transport d'hydrogène et des systèmes moins coûteux sont étudiées comme décrit ci-après. Lincoln Composites développe des tubes composites de plus grande capacité. Le matériau employé pour la fabrication du réservoir est une doublure en plastique entièrement enveloppée de fibres de carbone imprégnées d'époxy pour le transport par remorque de tubes d'hydrogène gazeux. Par exemple, le réservoir TITANTM (1,08 mètre de diamètre, 11,5 mètres de longueur, 8 400 litres de volume d'eau et 2 087 kg de poids) fonctionne à une pression de 250 bars. Il peut délivrer 2 à 3 fois plus d'hydrogène par rapport à la quantité d'hydrogène stockée/transportée dans des réservoirs en acier de masse similaire. La Figure 15 montre l'unité de stockage contenant quatre réservoirs composites capables de stocker 600 kg d'hydrogène à 250 bars. Les réservoirs adaptés à des pressions plus élevées sont en cours de développement.



Source: Lincoln Composites, 2014.

Figure 15 Une remorque transportant quatre réservoirs en composite développés par Lincoln Composites

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

Des technologies hybrides sont explorées au Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), comme la cryo-compression qui combine pression et basse température pour augmenter la quantité d'hydrogène pouvant être stockée par unité de volume et éviter les pénalités énergétiques associées à la liquéfaction de l'hydrogène. L'hydrogène gazeux comprimé à des températures cryogéniques est beaucoup plus dense que dans des réservoirs comprimés ordinaires à des températures ambiantes. Ces nouveaux réservoirs auraient le potentiel de stocker de l'hydrogène à des températures aussi basses que 80 K sous des pressions de 200 à 400 bars. Cette approche nécessite le développement de réservoirs composites isolés sous pression. On pourrait également envisager d'utiliser des réservoirs d'hydrogène gazeux froid qui nécessiteraient moins de refroidissement. Il existe peut-être une combinaison optimale de pression et de température dans la plage 80-200 K. Récemment, le LLNL a identifié des matériaux en fibre de verre peu coûteux pour le stockage d'hydrogène gazeux froid (environ 150 K et jusqu'à 500 bars), ce qui devrait permettre de réduire de 50 % le coût des remorques.

Les principaux dispositifs de sécurité utilisés dans les camions à gaz sont des soupapes de sécurité manuelles. Pendant le transport, tous les réservoirs de stockage d'hydrogène sont isolés par une vanne. En service, il existe différents dispositifs et procédures de sécurité :

- La procédure de changement de semi-remorque se déroule comme suit :
 - Le conducteur gare la semi-remorque à l'emplacement prévu,
 - Le conducteur met les cales en position et déploie la béquille,
 - Le conducteur dételle le tracteur,
 - Le conducteur raccorde le tuyau de la semi-remorque pleine, teste le joint du tuyau de vidange et déconnecte la semi-remorque vide,
 - Le conducteur accroche la semi-remorque vide au tracteur et repart.
- Un test manuel d'étanchéité lors du raccordement à une semi-remorque. Il s'effectue selon les étapes suivantes. L'opérateur raccorde le tuyau de la semi-remorque au poteau de raccordement de l'installation. Le tuyau est mis sous pression. L'opérateur vérifie l'étanchéité à l'aide de savon de détection et de stabilisation de la pression mesurée localement à l'aide d'un manomètre.

5.1.2 Camions à liquides cryogéniques

L'hydrogène peut également être transporté par la route sous forme liquide (refroidie en dessous de 20 K ou -253 °C) pour distribuer de plus grandes quantités (des centaines de m³/h). En termes de capacité pondérale, les camions d'hydrogène liquide super isolé (LH₂) peuvent transporter jusqu'à 10 fois plus d'hydrogène que les remorques à tubes utilisées pour le transport du CGH₂. Les camions LH₂ fonctionnant à la pression atmosphérique ont une capacité volumétrique d'environ 50 000 à 60 000 litres et peuvent transporter jusqu'à 4 000 kg (Figure 16). C'est un mode de distribution privilégié pour les moyennes/grandes quantités d'hydrogène sur de longues distances, ce qui explique que l'activité LH₂ se soit le plus développée en Amérique du Nord (la capacité de liquéfaction de l'hydrogène en Amérique du

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

Nord est environ dix fois supérieure à celle de l'Europe). L'hydrogène liquide transporté dans le camion est ensuite vaporisé à haute pression pour être utilisé sur le site du client.



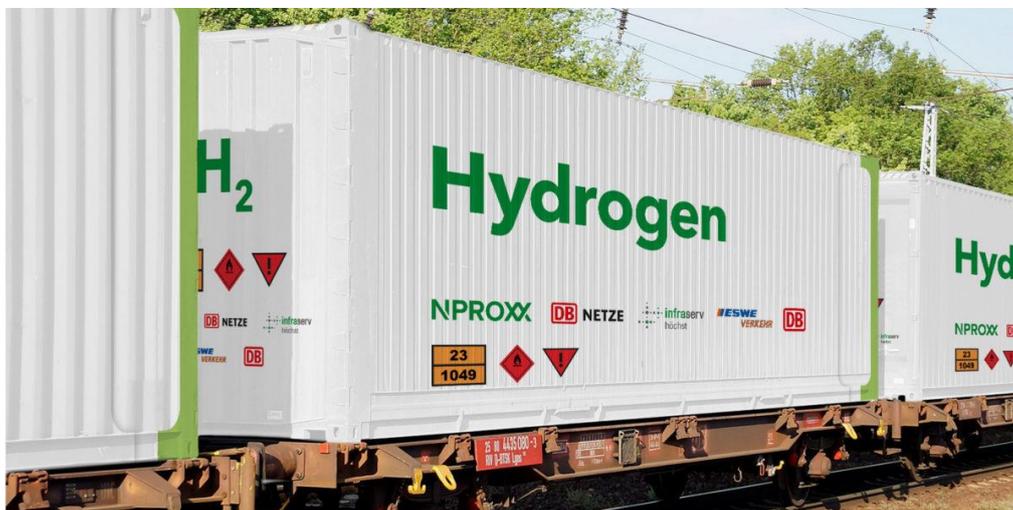
Source: AirLiquide Image Bank, 2015

Figure 16 Un camion-citerne exploité par Air Liquide pour transporter le LH₂ jusqu'à l'utilisateur final

Le principal problème de cette voie de transport est un processus de liquéfaction consommateur d'énergie et coûteux. L'énergie nécessaire à la liquéfaction représente 30 à 40 % du pouvoir calorifique inférieur de l'hydrogène (contre 10 % pour la compression du gaz) [21]. Les coûts de l'électricité représentent 50 à 80 % des coûts de liquéfaction. La distance est le principal facteur décisif entre le transport du LH₂ et celui de l'hydrogène gazeux CGH₂. Le nombre de camions de LH₂ dépendra de la demande d'hydrogène et de la localisation du point de liquéfaction. Cependant, la capacité du camion de liquide étant beaucoup plus élevée que celle d'un camion de gaz comprimé, ce mode de livraison est moins dépendant de la distance de transport. Les coûts d'investissement et d'exploitation (carburant, main-d'œuvre) du camion sont beaucoup plus faibles. Par conséquent, le transport par camion de liquide est plus économique que le transport par camion de gaz pour les longues distances (d'environ 400 km à des milliers de kilomètres) et les quantités moyennes d'hydrogène. Toutefois, il faut tenir compte de la disponibilité du LH₂. Actuellement, le marché de l'hydrogène industriel est desservi par quatre liquéficateurs en Europe et dix en Amérique du Nord. Des marchés plus importants justifieraient la construction de nouvelles usines de liquéfaction. Des réductions de coût significatives dues aux effets d'échelle des équipements de liquéfaction sont possibles. Cependant, ce mode de livraison dépend du prix de l'électricité et de la décision d'installer de nouvelles unités de liquéfaction. De meilleures technologies pourraient permettre de réduire les coûts d'investissement, d'améliorer l'efficacité énergétique du processus de liquéfaction et de réduire la quantité d'hydrogène perdue par évaporation pendant le stockage et le transport (le taux d'évaporation, qui dépend de la taille, de la forme, de l'isolation du réservoir et de la durée du stockage, est généralement de l'ordre de 0,2 % par jour pour un réservoir de 100 m³). Un certain nombre d'études sont en cours pour améliorer les technologies de liquéfaction et proposer de nouvelles approches (par exemple, amélioration de la conversion ortho-para, développement de la réfrigération magnétique, etc.).

5.2 Trains

Le premier train à hydrogène du Royaume-Uni, développé dans le cadre du projet HydroFLEX, a entamé son premier voyage sur les voies ferrées principales du Warwickshire en septembre 2020. D'autres trains à pile à combustible seront mis sur les rails dans toute l'Allemagne au cours des prochaines années. Mais la question reste de savoir comment approvisionner au mieux en hydrogène les stations de ravitaillement des trains. Un itinéraire potentiel est le chemin de fer, approuvé par l'Agence nationale de l'énergie de Hesse. Elle a chargé DB Energie, le fournisseur d'énergie de l'opérateur ferroviaire national allemand, Deutsche Bahn, d'étudier la faisabilité technique, opérationnelle et juridique de cette solution. Cette question a été examinée sur la base d'une source d'hydrogène existante dans le parc industriel de Höchst à Francfort-sur-le-Main sur deux itinéraires spécifiques dans la région Rhin-Main (voir la Figure 17).



Source: NPROXX, 2020

Figure 17 Transport d'hydrogène par rail

Il était possible d'approvisionner l'infrastructure de ravitaillement en hydrogène par le rail, ont conclu les experts de DB Energie. Par rapport à la route, les avantages sont nombreux, comme la planification précise des temps de transport, le haut niveau de fiabilité et de sécurité, la possibilité de transporter de grandes quantités et le soulagement du trafic routier dans les zones métropolitaines. D'un point de vue technique et juridique, rien ne s'oppose au transport par rail. Toutefois, il n'existe pas encore de réservoirs de transport d'hydrogène homologués pour le trafic ferroviaire, mais uniquement pour le trafic routier. Les exigences étant très similaires, il faut s'attendre à ce que la certification pour l'utilisation sur les rails puisse être obtenue prochainement. Pour connaître la faisabilité et l'efficacité économique, une étude distincte devrait être analysée pour comprendre si le transport par rail est plus économique que le transport par route. Sur les deux itinéraires examinés, le trafic ferroviaire a donné des résultats légèrement moins bons. Il n'a toutefois pas été possible d'en tirer des conclusions générales.

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

Toutefois, le transport de l'hydrogène par la route n'est pas une solution vraiment durable, surtout si l'on continue à ravitailler les trains à piles à combustible à l'avenir.

5.3 Canalisations

Un certain nombre de conduites d'hydrogène commerciales sont utilisées aujourd'hui pour distribuer de grandes quantités (des dizaines de milliers de m³/h) d'hydrogène gazeux au marché industriel. Leur longueur varie de moins d'un kilomètre à plusieurs centaines. Les principaux acteurs sont les entreprises de gaz industriels, à savoir Air Liquide, Air Products, Linde et Praxair. En réponse à une demande accrue d'hydrogène de la part des raffineries principalement, les réseaux existants sont étendus et de nouvelles portions sont construites. Par exemple, en mars 2009, Air Products a annoncé l'extension de 60 km du réseau de canalisations d'hydrogène de la côte américaine du Golfe du Mexique, en Louisiane. Le réseau d'hydrogène est estimé à environ 1 600 km en Europe et 1 100 km en Amérique du Nord. La plupart des pipelines sont situés là où de grandes quantités d'hydrogène sont consommées dans les secteurs du raffinage et de la chimie. Il s'agit notamment de systèmes dans le nord de l'Europe (couvrant les Pays-Bas, le nord de la France et la Belgique), en Allemagne (régions de la Ruhr et de Leipzig), au Royaume-Uni (Teesside) et en Amérique du Nord (Golfe du Mexique, Texas-Louisiane, Californie, Alberta). Des systèmes plus petits existent également en Afrique du Sud, au Brésil, en Thaïlande, en Corée, à Singapour et en Indonésie. Dans l'ensemble, la longueur de ces pipelines est faible par rapport au réseau mondial de pipelines de transport de gaz naturel, qui dépasse les 2 000 000 km.

La Figure 18 présente des parties du réseau mondial de pipelines d'hydrogène. Par exemple, le pipeline de 240 km de long dans la région de la Ruhr en Allemagne (Figure 18a), acquis par Air Liquide en 1998, est en service depuis 1938. Dans le cadre du projet européen "Zero Region" pour les applications énergétiques de l'hydrogène, Linde a installé un pipeline d'hydrogène de 900 bars (1" de diamètre) sur une distance de 1,7 km dans le parc industriel de Francfort-Hoechst pour alimenter les véhicules de tourisme à pile à combustible.

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

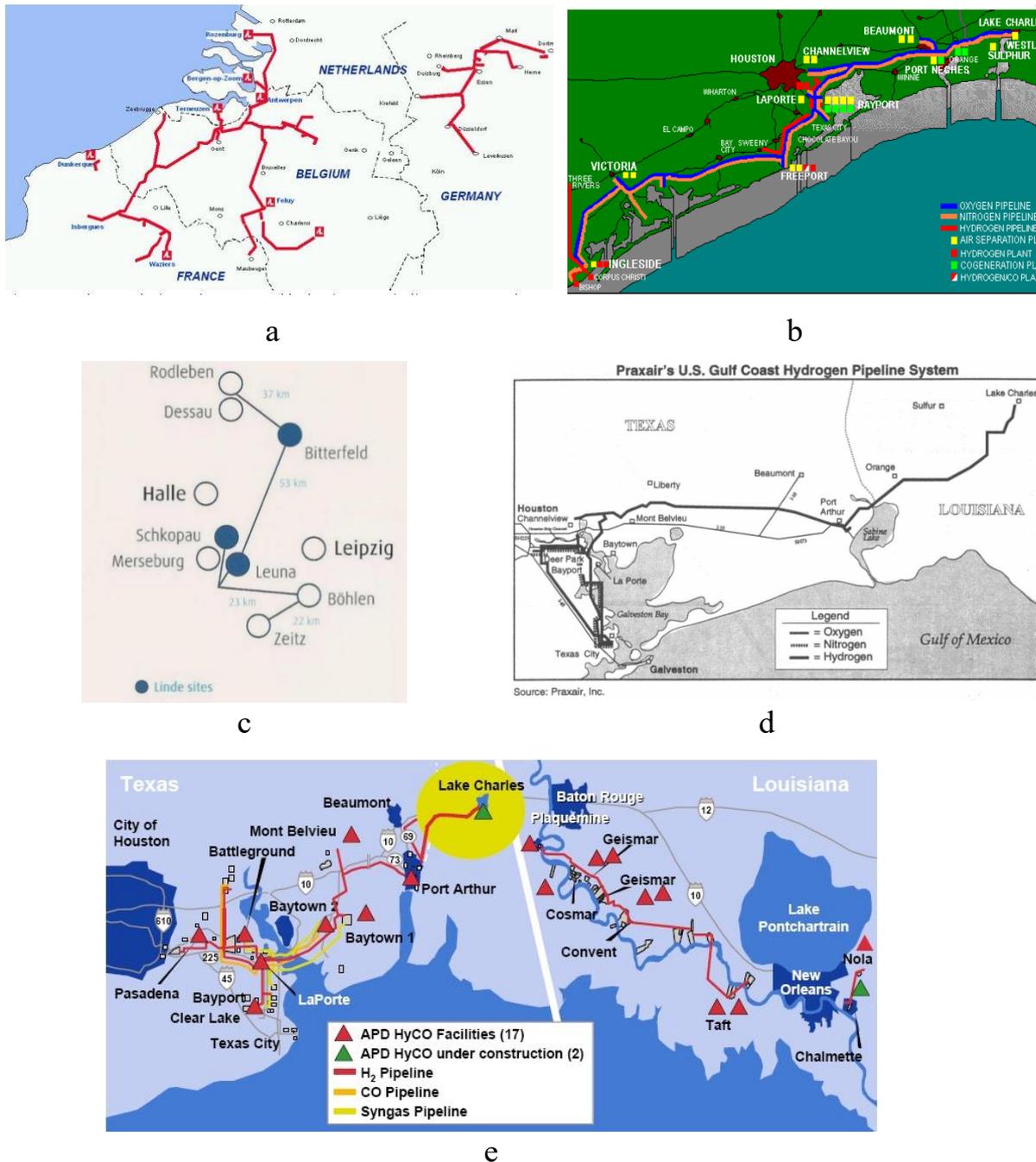


Figure 18 Principales canalisations d'hydrogène dans le monde : (a) canalisations d'hydrogène Air Liquide au Benelux, en France et en Allemagne (région de la Ruhr) ; (b) canalisations d'hydrogène Air Liquide sur la côte du Golfe (États-Unis) ; (c) canalisations d'hydrogène Linde en Allemagne ; (d) canalisations d'hydrogène Praxair sur la côte du Golfe (États-Unis) ; (e) canalisations d'hydrogène Air Product sur la côte du Golfe (États-Unis)

6. Applications stationnaires

6.1 Systèmes de production combinée de chaleur et d'électricité (PCCE)

Dans les centrales de cogénération traditionnelles, l'électricité et la chaleur sont produites par la combustion de gaz naturel dans le moteur à combustion interne ou la turbine. Les systèmes de cogénération basés sur les pile à combustible produisent de l'électricité et de l'eau chaude par la réaction électrochimique décrite précédemment. Deux technologies de pile à combustible sont considérées : la pile à combustible à oxyde solide (SOFC) et la pile à combustible PEM. Le gaz naturel est converti pour produire de l'hydrogène et un mélange d'hydrogène, de dioxyde de carbone et de monoxyde de carbone (appelé syngas) avec des impuretés est alimenté directement dans la PAC pour générer de l'énergie. Dans les systèmes PAC PEM, qui utilisent des températures plus basses, le gaz de synthèse doit être purifié davantage pour éliminer le monoxyde de carbone et les composés contenant du soufre. Des installations de micro-cogénération ont été introduites en Europe dans le cadre du projet Callux (<http://enefield.eu/>).

6.2 Production d'énergie de secours

L'objectif principal de ce type de technologie est de fournir une énergie instantanée en cas de coupure de courant. La capacité de puissance de cette installation est comprise entre 16 et 80 kW avec jusqu'à neuf bouteilles d'hydrogène. Les principaux avantages de cette application sont :

- Une grande fiabilité et un démarrage rapide,
- Autonomie évolutive, uniquement en fonction du volume de stockage du gaz,
- Faible maintenance,
- Fonctionnement propre et silencieux [1].

Les utilisateurs potentiels de ce type d'application sont les suivants : télécoms, centres de données, hôpitaux, armée, industries, hôtels de luxe, etc. Un exemple du système est illustré à la Figure 19 qui montre une unité d'alimentation de secours à PAC utilisée dans le projet IP Energy (Aix-en-Provence, France). Le système d'alimentation de secours de 30 kW installé en 2008 est la première solution conteneurisée. Le stockage interne de gaz a permis une capacité de fonctionnement de 4 heures.



Figure 19 Une alimentation de secours par pile à combustible couplée à un centre de données IP Energy

Les caractéristiques et concepts de sécurité du système sont les suivants :

- Le système pile à combustible possède deux lignes d'évent séparées, l'une pour l'oxygène et l'autre pour l'hydrogène, qui évacuent le gaz sur le toit du conteneur à une distance de danger pour éviter le mélange de l'oxygène et de l'hydrogène pendant l'évacuation. Après une évacuation, une quantité résiduelle d'hydrogène subsiste dans le système.
- Le compartiment de traitement est équipé de deux capteurs d'hydrogène qui peuvent déclencher un arrêt d'urgence si la concentration d'hydrogène dans les conteneurs est supérieure à 0,4 % volumique. Si une concentration anormale d'hydrogène est détectée, un arrêt de sécurité est déclenché et les actions suivantes ont lieu :
 - Arrêter tous les processus du système,
 - Activer les systèmes de ventilation mécanique,
 - Isoler les stockages de gaz en fermant les électrovannes.
- La concentration d'hydrogène est surveillée en permanence, même lorsque le système est en mode veille. En cas de perte de détection, le système déclenche un arrêt de sécurité.
- Les conteneurs sont équipés de détecteurs d'incendie. En cas de leur activation, les actions suivantes doivent être entreprises :
 - Arrêter tous les processus du système,
 - Isoler les stockages de gaz en fermant les électrovannes,
 - Couper les ventilations.
- Les atmosphères explosives dangereuses résultant de fuites ou de rejets potentiels d'hydrogène doivent être évitées dans l'enceinte de la PAC. Les mesures de prévention passive comprennent, sans s'y limiter : l'utilisation de joints fixés de manière permanente et construits de façon à limiter le taux de libération maximal à une valeur prévisible ; et la ventilation naturelle. Les méthodes de prévention active comprennent, sans s'y limiter : une ventilation active ; un système de détection des gaz inflammables

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

; d'autres moyens de détection des fuites (par exemple, par des mesures de pression par rapport aux paramètres de contrôle).

- L'intérieur du conteneur, où l'hydrogène peut fuir ou se diffuser, n'est pas classé puisque des barrières de sécurité garantissent l'absence d'hydrogène dangereux ATEX au point de fuite ou par accumulation. Néanmoins, tous les équipements installés juste en dessous du plafond du conteneur et capables d'enflammer des mélanges hydrogène-air inflammables sont certifiés pour de la zone 2. Il s'agit en particulier des capteurs d'hydrogène et d'incendie et du système de ventilation. En outre, le compartiment électrique est systématiquement séparé du compartiment de traitement.
- L'oxygène n'est pas inflammable dans l'air mais il favorise le processus de combustion. Une fuite d'oxygène peut être à l'origine d'un incendie. Le risque d'incendie est accru lorsque l'atmosphère est enrichie en oxygène. Tout contact doit être évité entre l'oxygène et les matières organiques en raison du risque d'incendie.
- Des mesures générales de prévention des risques sont prises lors de la conception et de l'exploitation de ce système :
 - Choix correct des matériaux (ex : inox dégraissé), utilisation de tuyaux protégés et sans coudes brusques, raccords étanches, etc,
 - Limitation des débits d'oxygène en fonction de la pression,
 - Protection des lignes d'oxygène par des filtres afin de piéger les poussières susceptibles de s'enflammer,
 - Ventilation naturelle et forcée dans le compartiment de traitement,
 - Réduction des longueurs des conduites sous haute pression, danger suffisant des conduites par rapport aux composants électriques,
 - Regroupement des unités contenant de l'oxygène dans une zone délimitée (compartiment).
- Respect des procédures de contrôle et de maintenance (essais périodiques) de l'installation [1].

7. Applications marines

Les piles à combustible à hydrogène ont prouvé leurs performances dans de nombreuses applications, notamment les bus, les camions, les voitures, les chariots élévateurs et même les trains de passagers. Grâce à leur succès dans les véhicules terrestres lourds, les piles à combustible sont maintenant intégrées dans les navires. Les piles à combustible joueront un rôle clé en aidant les industries maritimes à lutter contre les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) sur l'eau et dans les ports.

La navigation maritime est bien connue pour être une source importante d'émissions de GES. Les GES élevés sont le résultat du carburant traditionnel de faible qualité utilisé dans les moteurs des navires, qui génèrent de fortes émissions. Ces dernières années, la pression publique concernant la pollution atmosphérique et le changement climatique a incité les gouvernements et autres autorités à prendre des mesures pour les réduire. En conséquence, des

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

réglementations de réduction des GES visant le trafic maritime sont mises en place dans le monde entier. Par exemple :

- Le Parlement norvégien, en 2018, a adopté une résolution visant à protéger les fjords du pays, inscrits au patrimoine mondial : cette résolution mettra fin à toutes les émissions des navires de croisière et des ferries dans les fjords d'ici 2026 [22],
- Les normes d'émissions visibles de l'État de l'Alaska limitent l'opacité de tous les navires marins dans un rayon de trois miles de leurs côtes,
- L'Organisation Maritime Internationale (OMI ou IMO – International Maritime Organization) a adopté des mesures obligatoires pour réduire les émissions de GES et les éliminer complètement d'ici la fin du siècle. Leur stratégie initiale vise à réduire les émissions totales de GES du transport maritime international d'au moins 50 % par rapport aux niveaux de 2008 d'ici 2050,
- L'Agence Européenne pour la Sécurité Maritime (AESM ou EMSA - European Maritime Safety Agency) prévoit de réduire les émissions de dioxyde de carbone du transport maritime de l'UE d'au moins 40 % (par rapport aux niveaux de 2005) d'ici 2050. Des ECAs supplémentaires sont en cours de discussion pour l'Arctique, l'Amérique centrale, la Méditerranée et la mer Noire, le Japon, la Corée et l'Australie.

Ces réglementations sur les émissions auront un impact significatif sur les navires maritimes et les organisations qui les exploitent. Pour s'adapter à ces changements, les exploitants de flottes ont besoin de solutions qui réduisent considérablement les émissions. Avec autant de types de navires différents sur l'eau, l'industrie maritime a besoin d'une véritable solution à émissions nulles qui puisse être appliquée à différents types de navires.

Les batteries constituent une solution d'alimentation à émissions nulles pour les petits navires qui fonctionnent avec des cycles de service courts, par exemple les petits ferries de passagers et les bateaux de service sur les lacs. Cependant, la densité de puissance plus faible et le poids plus élevé limitent l'utilisation des batteries pour de nombreuses applications. Pour les navires, les piles à combustible sont la seule option viable et véritable sans émission. Tout comme les batteries, les piles à combustible produisent de l'électricité avec un rendement élevé grâce à un processus électrochimique. La différence est qu'avec une pile à combustible, l'énergie est stockée sous forme d'hydrogène. Tant que le combustible est disponible, les systèmes d'alimentation par pile à combustible produisent de l'électricité comme un générateur. Les seules émissions d'une pile à combustible sont la vapeur d'eau et la chaleur.

En outre, l'hydrogène peut être produit à partir de sources renouvelables, notamment l'énergie solaire, éolienne, hydroélectrique et géothermique. Et le coût de l'hydrogène renouvelable continue de baisser chaque année, d'autant plus que des projets de production à grande échelle commencent à voir le jour en Europe, en Australie et au Chili. Lorsqu'il est alimenté par de l'hydrogène renouvelable, un système d'alimentation par piles à combustible est une véritable source d'énergie sans émissions, en mode veille.

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

La transition vers une nouvelle source d'énergie est une entreprise majeure. Dans le cas des piles à combustible pour les navires, les obstacles résident dans l'infrastructure de ravitaillement et la disponibilité de l'hydrogène dans les ports. Avant que les opérateurs puissent alimenter leurs navires à l'aide de piles à combustible, l'approvisionnement en hydrogène et l'infrastructure de ravitaillement doivent être développés.

Dans un avenir plus proche, les applications hybrides batterie/pile à combustible sont viables. Elles nécessitent moins de carburant tout en respectant l'objectif de zéro émission. Ces applications sont les suivantes :

- L'alimentation de petits navires, tels que les ferries et les bateaux fluviaux.
- L'alimentation de charges auxiliaires sur des navires plus grands, tels que les bateaux de croisière, où les besoins en énergie auxiliaire sont élevés.
- Fournir de l'énergie à quai aux navires amarrés.

L'utilisation de piles à combustible pour les applications marines présente trois avantages essentiels : Les systèmes d'alimentation modulaires s'adaptent à de nombreuses exigences de charge.



Figure 20 Module de pile à combustible marine Ballard de 100 kW

Les piles à combustible PEM (membrane échangeuse de protons) de Ballard sont modulaires (Figure 20). Elles peuvent être utilisées dans diverses combinaisons en parallèle pour fournir la puissance et la redondance nécessaires à un navire, de 100kW à 1MW ou plus.

- L'alimentation en courant continu est compatible avec les architectures électriques.

Les piles à combustible PEM de Ballard sont une source d'énergie continue importante, compatible avec les architectures électriques hybrides à batterie. Elles peuvent être déployées

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

dans des configurations parallèles et réparties pour répondre aux besoins de puissance variable de la :

- La propulsion électrique hybride,
- Des systèmes d'alimentation auxiliaires,
- Les systèmes de piles à combustible ont une configuration flexible.

Dans un système de piles à combustible, les éléments de production d'énergie et de stockage du combustible sont séparés, ce qui offre à l'architecte du navire plus de flexibilité que les batteries. Le système d'alimentation par pile à combustible de Ballard a une configuration flexible qui s'adaptera aux contraintes d'espace du navire.

Il peut être décomposé en plusieurs modules, positionnés à différents endroits. De plus, les experts de Ballard peuvent évaluer les cycles de fonctionnement de n'importe quelle taille ou type de navire. Ils peuvent développer une solution viable et pratique en déterminant l'optimum :

- L'architecture hybride,
- L'alimentation par piles à combustible,
- Les exigences en matière d'immobilisation,
- Les besoins en stockage de carburant,
- La consommation estimée de carburant.

Les piles à combustible peuvent être utilisées sur différents types de navires, par exemple les ferries, les bateaux de croisière, les bateaux fluviaux, etc. Pour les ferries, des systèmes de piles à combustible modulaires et évolutifs peuvent fournir une propulsion sans émissions pour les petits et les grands ferries. Les premiers ferries à émissions nulles devraient être propulsés par une architecture hybride composée de piles à combustible et de batteries. Le rapport spécifique entre les batteries et les piles à combustible dépendrait de la durée et de l'horaire du trajet. Étant donné que les piles à combustible fournissent un courant continu important, elles peuvent également fournir de l'énergie qui peut être distribuée dans un ferry (ou un autre navire) pour alimenter ses besoins électriques auxiliaires, tels que l'éclairage, le chauffage, la climatisation, les instruments du navire, les systèmes d'urgence, les cuisines et d'autres systèmes à bord. Pour plus d'efficacité, le surplus de chaleur généré par les piles à combustible pourrait être utilisé pour chauffer l'eau pour le chauffage, la climatisation, la lessive et d'autres usages. L'eau produite par la pile à combustible peut être récupérée si nécessaire.

Les applications des navires de croisière pourraient être parmi les premières utilisations marines des piles à combustible. Certains ports de croisière exigent déjà un fonctionnement sans émissions. Pour les navires de croisière, les applications de l'énergie des piles à combustible comprennent la production d'énergie pour les charges hôtelières, les systèmes d'urgence et une partie de la puissance de propulsion. Pour que l'industrie atteigne ses objectifs d'émissions nulles au cours du siècle, les piles à combustible devraient fournir 100 % de

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

l'énergie sur de nombreux navires de croisière, à mesure que l'infrastructure de l'hydrogène se développe.

Les piles à combustible constituent une solution viable pour la propulsion sans émission des navires fluviaux, y compris les barges poussées ou remorquées par des bateaux-pousseurs et des remorqueurs, ainsi que les navires autopropulsés. Ballard travaille déjà sur un projet de démonstration de propulsion de navires fluviaux à Lyon, en France (Figure 21). Ce projet permettra d'alimenter un bateau-pousseur en tant que navire utilitaire sur l'un des fleuves les plus exigeants du monde, le Rhône.



Figure 21 Le projet d'alimentation des navires fluviaux de Ballard à Lyon, France

Dans un effort pour réduire la pollution atmosphérique et les émissions de carbone, les gouvernements, les autorités portuaires et les organisations du monde entier renforcent les normes d'émissions pour les navires. En conséquence, l'industrie maritime se retrouve sous pression pour répondre aux futures réglementations sur les émissions nulles. L'alimentation par piles à combustible à hydrogène - une solution éprouvée à émissions nulles pour alimenter les autobus urbains, les camions et d'autres moyens de transport lourds - offre un réel potentiel pour divers navires. Alimentés par de l'hydrogène renouvelable, les systèmes de piles à combustible constituent la solution la plus pratique et la plus viable pour réduire les émissions. La mise en œuvre de cette technologie est une étape essentielle dans la réduction des émissions des navires et l'assainissement de l'air pour un monde plus vivable.

8. Systèmes de stockage d'énergie à base d'hydrogène

Comme exemple de système de stockage d'énergie à base d'hydrogène, nous allons considérer la Greenenergy Box. La Greenenergy BoxTM est une chaîne hydrogène conteneurisée comprenant un électrolyseur, une pile à combustible, un système de gestion de l'eau et de la chaleur, et des systèmes de conversion électrique couplés à des stockages d'hydrogène et d'oxygène. La Greenenergy BoxTM est un système modulaire intégré qui peut offrir une puissance de 50 à 500 kW avec une capacité de stockage de 0,2 à 2 MW. Son principe est indiqué dans la Figure 22. Plusieurs systèmes peuvent être couplés pour augmenter la puissance

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants et la capacité énergétique en assurant la fonction de système de secours pour quelques heures à forte puissance [1].

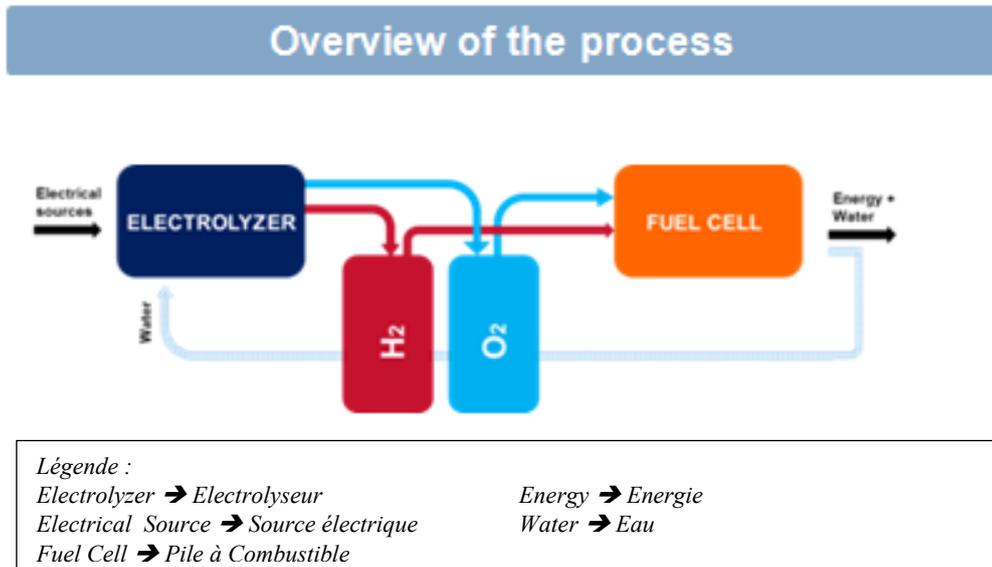
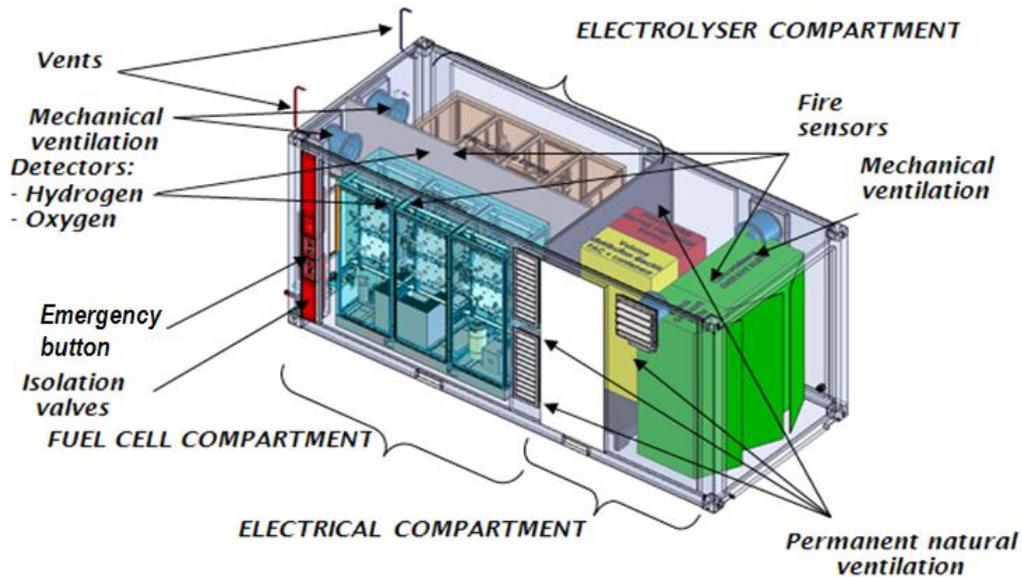


Figure 22 Un aperçu du processus de la Greenenergy Box

Les panneaux photovoltaïques fournissent de l'électricité au réseau électrique et son surplus est utilisé par l'électrolyseur pour générer de l'hydrogène et de l'oxygène gazeux. Une fois produits, l'hydrogène et l'oxygène gazeux sont stockés dans des réservoirs séparés installés à côté de la Greenenergy BoxTM. Grâce au système de pile à combustible, l'hydrogène et l'oxygène stockés peuvent être utilisés pour produire de l'électricité afin d'assurer l'autonomie énergétique partielle des bâtiments ainsi que le système de secours en cas de coupure de courant. La Greenenergy BoxTM gère elle-même l'électricité reçue par les panneaux photovoltaïques pour électrolyser l'eau ou pour fournir de l'électricité au réseau. De plus, la chaleur, qui est également produite par le système lors des processus d'électrolyse et de pile à combustible, est également gérée et valorisée pour les bâtiments adjacents. La Greenenergy BoxTM, imperméable et résistante au vent, est composée de trois compartiments différents : un compartiment électrique, un compartiment pile à combustible et un compartiment électrolyseur, comme le montre la Figure 23.



<i>Légende :</i>	
<i>Electrolyzer Compartment</i>	<i>→ Compartment de l'électrolyseur</i>
<i>Electrical Source</i>	<i>→ Source électrique</i>
<i>Fuel Cell Compartment</i>	<i>→ Compartment de la Pile à Combustible</i>
<i>Vents</i>	<i>→ Evénements</i>
<i>Fire sensors</i>	<i>→ Capteurs de feu</i>
<i>Mechanical ventilation</i>	<i>→ Ventilation mécanique</i>
<i>Detectors : Hydrogen / Oxygène</i>	<i>→ Détecteurs d'hydrogène et détecteurs d'oxygène</i>
<i>Isolation Valves</i>	<i>→ Vanne d'isolement</i>
<i>Permanent natural ventilation</i>	<i>→ Ventilation naturelle permanente</i>
<i>Emergency button</i>	<i>→ Bouton d'urgence</i>

Figure 23 Schéma de la Greenenergy Box™ [1]

La Greenenergy Box™ est certifiée CE en suivant la directive basse tension 73/23/CEE, la directive sur la compatibilité électromagnétique CEM 89/336/CEE, la directive sur les machines MD 98/37/CE, la directive sur les équipements sous pression 97/23/CE. L'évaluation des risques pour ce système s'effectue en trois étapes. Tout d'abord, un document intitulé "Considérations de base sur la sécurité" décrivant les principales exigences de sécurité à respecter lors des étapes d'architecture et de conception de la chaîne hydrogène est préparé. Une fois que l'architecture du système est suffisamment détaillée, une étude HAZOP (HAZard and OPerability Study) de chaque sous-système est réalisée pour définir les causes potentielles de chaque déviation du processus, les conséquences potentielles associées et évaluer les barrières existantes. Dans un troisième temps, une analyse par arbre de défaillance complète l'étude HAZOP pour mettre en évidence les défaillances de conception, la configuration inappropriée du système et les sources externes de danger. L'ensemble des études de sécurité est rassemblé dans un document intitulé "Synthèse des études de sécurité de la Greenenergy Box™" [1]. La stratégie de sécurité globale de la chaîne hydrogène est détaillée ci-dessous dans les différentes parties suivantes.

- Suppression et contrôle des fuites.

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

- Les matériaux des équipements et des tuyauteries sont choisis pour être compatibles avec l'utilisation de l'hydrogène et de l'oxygène. En particulier, la fragilisation des matériaux par l'hydrogène et la corrosion par l'oxygène sont sélectionnées à partir des normes IGC² 15/06, ISO/TR 15916 et ISO 11114-4. Les bouteilles en acier sont couramment utilisées pour stocker l'hydrogène et l'oxygène sous pression. L'équivalent carbone maximum pour l'hydrogène est de 0,43 comme décrit dans le document IGC 121/04, § 3.
 - Les raccords soudés sont préférables et sont utilisés de manière pratique pour minimiser les sources de fuites potentielles. Le nombre de joints et de connexions ajustées est réduit au minimum.
 - Les deux compartiments électrolyseur et pile à combustible de la Greenenergy BoxTM sont équipés de deux capteurs d'hydrogène et d'un capteur d'oxygène. Une vanne d'arrêt de sécurité se déclenche à 10 % de la Limite inférieure d'inflammabilité (LII) d'hydrogène (0,4 vol. % H₂ dans l'air) et un arrêt d'urgence se produit à 25 % de la LII (1 vol. % H₂ dans l'air). La détection d'oxygène se déclenche lorsque la concentration d'oxygène atteint plus de 23 % en volume dans l'air.
 - En outre, les fuites d'hydrogène et d'oxygène sont également détectées par différence de pression pendant les phases de veille. Si un réservoir ou une partie de la conduite perd de la pression pendant une phase d'attente, cela signifie potentiellement qu'il y a une fuite. S'il y a une perte de pression mineure pendant la phase de veille, une alarme se déclenche et si la perte de pression est trop importante, le système ne pourra pas redémarrer.
 - Avant la mise en service, des tests hydrauliques et d'étanchéité sont effectués comme l'exige la directive sur les équipements sous pression.
 - Des inspections régulières et un programme de maintenance préventive sont organisés pour garantir un niveau de sécurité maximal. En particulier, des tests d'étanchéité sur les régulateurs de pression, les vannes, les tuyaux, les joints et les connexions, etc. sont réalisés régulièrement. Des inspections visuelles régulières sont organisées pour vérifier le niveau de corrosion. Les informations concernant la fréquence des inspections et de la maintenance figurent dans les annexes F des documents IGC 121/04 et IGC 13/02.
- Prévention de la formation d'atmosphères inflammables ou sur-oxygénées.
- Trois compartiments de la Greenenergy BoxTM sont ventilés naturellement grâce à des événements latéraux situés de part et d'autre du conteneur (Figure 22).
 - Les compartiments de la pile à combustible et de l'électrolyseur sont tous deux équipés d'une ventilation de type ATEX qui se déclenche pour une concentration en hydrogène et en oxygène supérieure à respectivement 0,4 vol. % d'hydrogène ou 23 vol. % d'oxygène dans l'air. Les débits maximaux sont fixés pour la dissipation thermique, soit

² IGC : International Gas Code

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

2 500 m³/h pour le compartiment de la pile et 2 700 m³/h pour le compartiment de l'électrolyseur.

- La modélisation d'une fuite accidentelle d'hydrogène d'un débit de 750 L/min en utilisant l'approche LES (Large Eddy Simulation) développée à l'Université d'Ulster met en évidence qu'il faut environ 10 s pour qu'un capteur d'hydrogène détecte une concentration d'hydrogène supérieure à 0,4 vol. En considérant l'hypothèse conservatrice d'un temps de réponse de 30 s pour le capteur d'hydrogène, on peut observer qu'après 40 s de libération constante continue, la concentration d'hydrogène dans l'air formée sous le plafond est toujours inférieure à la LII de l'hydrogène dans l'air, c'est-à-dire moins de 4 % en volume. A partir de ce moment, le capteur d'hydrogène envoie un signal à la commande de contrôle qui déclenche le ventilateur d'admission d'air à sa vitesse maximale. On peut observer que le nuage d'hydrogène dans l'air est entièrement dilué en moins de 2 s.
- Suppression/réduction des sources d'ignition :
 - L'intérieur de la Greenenergy BoxTM où l'hydrogène peut fuir ou se diffuser n'est pas classé car des barrières de sécurité garantissent l'absence d'hydrogène dangereux ATEX au point de fuite ou par accumulation. Néanmoins, tous les équipements installés juste en dessous du plafond du conteneur et capables d'enflammer un mélange hydrogène-air inflammable sont certifiés pour une zone 2. Il s'agit en particulier des détecteurs d'incendie, des capteurs d'hydrogène et d'oxygène et du système de ventilation.
 - La Greenenergy BoxTM et les réservoirs sont mis à la terre et reliés entre eux pour assurer une protection contre les risques de courants électriques vagabonds et d'électricité statique.
- Protection contre les surpressions :
 - Chaque réservoir et la tuyauterie reliant la Greenenergy BoxTM aux réservoirs de stockage sont équipés d'une soupape de surpression (PRV). La pression de tarage de la soupape de sécurité est réglée de façon à ce que la soupape se déclenche lorsque la pression dans le réservoir atteint 1,15 de la pression maximale de fonctionnement.
 - Les événements des réservoirs de stockage sont montés verticalement à une hauteur minimale de 3 m. Ils sont équipés d'un "chapeau", dont le poids est calibré pour être soulevé sous pression afin d'éviter l'introduction d'eau dans l'événement.
 - La Greenenergy BoxTM est équipée de deux événements distincts pour l'hydrogène et l'oxygène situés à une hauteur minimale de 1 m au-dessus du toit du conteneur et bien séparés pour éviter le mélange hydrogène-air enrichi en oxygène. Chaque ligne de ventilation distincte est commune à l'électrolyseur et à la pile à combustible et permet la dépressurisation du système en moins de 2 minutes en cas d'arrêt d'urgence.
- Arrêt d'urgence et de sécurité :

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

- La commande de contrôle qui est utilisée pour piloter automatiquement le système est également utilisée pour déclencher les fonctions de sécurité. Environ 70 fonctions de sécurité sont enregistrées dans la commande de contrôle pour détecter toute déviation du processus, toute fuite gazeuse ou tout incendie dans le système. En fonction de l'amplitude de l'écart par rapport au seuil de sécurité du paramètre, un arrêt d'urgence ou de sécurité est déclenché, suivi d'un arrêt de l'alimentation électrique, de la dépressurisation du système, de l'inertage et de l'activation de la ventilation (sauf pour les incendies).
- Les principales fonctions de sécurité, à savoir les détections d'hydrogène, d'oxygène et d'incendie, le bouton d'arrêt d'urgence et le chien de garde de la commande de contrôle, sont réalisées par câblage logique et respectent un SIL 1 (Safety Integrity Level 1) [1].

9. Aperçu des incidents et des accidents

9.1 Incidents et accidents sur les systèmes et infrastructures de piles à combustible et d'hydrogène (PCH)

Un incident est un événement qui a la capacité d'entraîner une perte ou une perturbation des opérations, des services ou des fonctions - qui, s'il n'est pas géré, peut dégénérer en une urgence, une crise ou une catastrophe [18], et un accident est un événement ou une circonstance imprévu et non planifié causant des pertes ou des blessures. La déclaration des incidents/accidents survenus sur les systèmes ou les infrastructures PCH, ainsi qu'une évaluation complexe de leurs causes principales et des enseignements qui en ont été tirés, sont des exercices extrêmement précieux pour les secteurs privé et public. Des informations sur les accidents ou incidents liés aux technologies des PCH peuvent être trouvées dans les bases de données bien connues suivantes :

- Enseignements tirés des incidents et des quasi-accidents liés à l'hydrogène : <http://h2tools.org/lessons/>
- Base de données des incidents et accidents liés à l'hydrogène (HIAD) : <https://odin.jrc.ec.europa.eu/odin/index.jsphttps://odin.jrc.ec.europa.eu/odin/index.jsp>
- Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industries (BARPI) <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/le-barpi/?lang=enbarpi%2Fhttps://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/the-barpi/?lang=enbarpi/>

Toutes les bases de données doivent être régulièrement mises à jour.

Par exemple, la base de données H₂ Incidents (récemment renommée Hydrogen Tools. Lessons Learned) a été créée par le Pacific Northwest National Laboratory avec le financement du ministère américain de l'énergie (<https://h2tools.org/lessons>). Dans cette base de données, les

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

incidents et les quasi-accidents sont signalés sans inclure le nom des entreprises et d'autres détails, de manière à ce que la confidentialité encourage le signalement des événements. Les incidents sont classés en fonction du contexte, de l'équipement, des dommages et des blessures, des causes probables et des facteurs contributifs [3].

Rigas et Amyotte [3] ont défini les principales causes d'incidents/accidents suivantes :

- Défaillance mécanique du matériel ou de l'équipement,
- Attaque par la corrosion,
- Surpressurisation,
- Fragilisation de l'hydrogène à basse température,
- Explosion de vapeur en expansion d'un liquide en ébullition (BLEVE),
- Rupture du réservoir de stockage due à l'impact des ondes de choc ou des missiles provenant d'explosions adjacentes,
- Erreur humaine.

Dans ce premier cours, nous n'aborderons que quelques exemples d'incidents/accidents liés aux technologies des piles à combustible et à hydrogène. Toutefois, les exposés suivants comprendront un certain nombre d'exemples pertinents pour chaque système de pile à combustible et à hydrogène étudié.

9.2 Accidents survenus pendant la production d'hydrogène



Source: Millet et al, 2011 [45]

Figure 24 Pièces endommagées de l'électrolyseur PEM haute pression

Une explosion d'un électrolyseur à la pression opérationnelle de 40 MPa s'est produite le 7 décembre 2005, dans un stand de démonstration d'hydrogène à l'Université de Kyushu (Japon) [19]. Il est possible qu'à la suite d'une fuite de la membrane, un feu interne de jet d'hydrogène et d'oxygène ait entraîné un feu de métal (titane) et une explosion ou une rupture de l'enveloppe de l'électrolyseur. Le fluide interne et les produits de combustion ont été libérés dans les environs, y compris sur le parking à l'extérieur du bâtiment du laboratoire. Les pare-brise de plusieurs véhicules ont été endommagés en raison de l'exposition au fluorure d'hydrogène qui s'est formé lors de la décomposition d'un matériau polymère de la membrane [19]. Une étude

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

franco-russe [20] a analysé les mécanismes de défaillance des cellules d'électrolyse de l'eau PEM, qui peuvent conduire à la destruction de l'électrolyseur. Un processus en deux étapes impliquant initialement la perforation locale de l'électrolyte polymère solide suivie d'une recombinaison catalytique de l'hydrogène et de l'oxygène stockés dans les compartiments d'électrolyse a été mis en évidence. Les photographies d'un raccord en acier inoxydable et d'un écrou perforés par une flamme d'hydrogène-oxygène formée à l'intérieur de l'empilement PEM sont présentées sur la Figure 24.

9.3 Un incident dans une station de ravitaillement en carburant

Un rejet d'hydrogène gazeux s'est produit à la station de ravitaillement d'Emeryville [23]. Un dispositif de décompression (PRD – Pressure Relief Device) s'est rompu, 300 kg d'hydrogène se sont libérés et se sont ensuite enflammés. Le gaz s'est enflammé à la sortie du tuyau d'évent et a brûlé pendant 2,5 heures jusqu'à ce que les techniciens soient autorisés par les pompiers locaux à entrer dans la station et à arrêter l'écoulement du gaz. Pendant cet incident, les pompiers ont évacué les entreprises et les écoles voisines et ont fermé les rues adjacentes.

Les causes profondes identifiées de cet événement sont :

- L'utilisation de matériaux incompatibles dans la fabrication du PRD,
- Un assemblage incorrect entraînant un serrage excessif de l'assemblage interne,
- Un durcissement excessif des matériaux de l'assemblage interne par le fabricant de la vanne.

Ces problèmes auraient pu être évités par des procédures adéquates d'assurance qualité et de contrôle qualité lors des revues de conception et de sécurité.

10. Introduction au e-Laboratoire

L'éducation et la formation dans le secteur émergent des piles à combustible et de l'hydrogène (PCH) sont essentielles au développement professionnel de la main-d'œuvre actuelle et future. Cela sous-tend le leadership et la compétitivité des produits européens dans ce domaine. Un référentiel en ligne d'outils numériques - le e-Laboratoire - a été développé dans le cadre du projet européen "Novel Education and Training Tools based on digital Applications related to Hydrogen and Fuel Cell Technology"³ (NET-Tools). Le NET-Tools e-Laboratory original comprend une vaste gamme d'outils numériques. Les outils jugés les plus pertinents pour les intervenants ont été mis à disposition par le biais du NET-Tools e-Laboratory pour la sécurité de l'hydrogène, auquel on peut accéder via la plate-forme électronique HyResponde (<https://hyresponder.eu/e-platform/>) ou directement à <https://elab.hysafer.ulster.ac.uk/>.

³ "Novel Education and Training Tools based on digital Applications related to Hydrogen and Fuel Cell Technology": Nouveaux outils d'éducation et de formation basés sur des applications numériques liées à la technologie de l'hydrogène et des piles à combustible

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

Le calcul basé sur les performances des distances de danger, terme introduit récemment par l'ISO TC197 - Technologies de l'hydrogène, est un élément clé de l'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène pour les systèmes et infrastructures PCH, par exemple les stations de ravitaillement. Les principes qui sous-tendent le NET-Tools e-Laboratory de la sécurité de l'hydrogène permettent d'évaluer les distances de danger pour les rejets non allumés (taille de l'enveloppe inflammable) ; les rejets allumés (feux en jet) ; la désintégration de l'onde de choc des déflagrations, des détonations et de la rupture du réservoir de stockage d'hydrogène à haute pression dans un incendie, les boules de feu, etc. Cette boîte à outils, attendue depuis longtemps par l'industrie de l'hydrogène, permet de déterminer les distances de danger pour les rejets non enflammés et les feux de jet en régime interactif, par exemple en faisant varier les paramètres du système tels que la pression et le diamètre des tuyaux (fuites). Les outils de sécurité de pointe du laboratoire électronique de sécurité de l'hydrogène sont une analogie européenne étendue et en libre accès de l'outil HyRAM (Hydrogen Risk Assessment Methods - Méthodes d'évaluation des risques hydrogène), qui a été développé par les Sandia National Laboratories (SNL) au cours de la dernière décennie grâce à un financement du ministère américain de l'énergie. Le NET-Tools e-Laboratory démontre le leadership européen en matière d'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène, notamment par sa capacité à calculer les distances de danger déterminées par les effets thermiques et de pression d'une boule de feu et d'une onde de choc après la rupture d'un réservoir lors d'un incendie, qui sont absents de l'outil HyRAM et un cadre canadien similaire (UTRQ) est mis en œuvre à l'aide de l'environnement de développement web Smalltalk Seaside.

Références

- [1] HyResponse Deliverable D2.1-Description of selected FCH systems and infrastructure, relevant safety features and concepts (2014). Available from: <http://www.hyresponse.eu> [accessed 10.10.20].
- [2] Mays, T. (2014). Scientific progress and technological bottlenecks in hydrogen storage. H2FC European Technical School on Hydrogen and Fuel Cells. 23-27 June 2014, Crete, Greece.
- [3] Rigas, F and Amyotte, P (2013). Hydrogen safety. Boca Raton: CRC press. Taylor and Francis Group.
- [4] Rigas, F and Amyotte, P (2013). Myths and facts about hydrogen hazards. Chemical Engineering Transactions. Vol. 31.
- [5] ENVIRONMENTAL GRAFFITI ALPHA (2010). The Hindenburg Disaster in Pictures. Available from: <http://www.environmentalgraffiti.com/anthropology-and-history/news-hindenburgdisaster-accident-waiting-happen>. [accessed 24.12.11].
- [6] World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (WP.29), 160th Session, Geneva, 25-28 June 2013.

Cours 1: Introduction à la sécurité de l'hydrogène pour les intervenants

- [7] US DoE, US Department of Energy (2008). Hydrogen safety training for first responders. Available from: <http://hydrogen.pnl.gov/FirstResponders/> [accessed on 06.11.20].
- [8] CEP, Clean Energy Partnership, 2014. Available from: <http://www.cleanenergypartnership.de/tech/site.php?l=en> [accessed on 01.05.14].
- [9] HyFLEETE-CUTE (2006-2009). Available from: <https://www.fuelcellbuses.eu/wiki/history-fuel-cell-electric-buses/hyfleet-cute-2006-2009> [accessed on 04.11.2020].
- [10] Zaetta, R and Madden, B (2011). Next HyLights project. Deliverable 3.1: Hydrogen Fuel Cell Bus Technology State of the Art Review.
- [11] California Fuel Cells Partnership, 2014. Available from: <http://cafcp.org/> [accessed on 06.11.20].
- [12] Adams, P (2004). Identification of the optimum on-board storage pressure for gaseous hydrogen city buses. European Integrated Hydrogen project – Phase 2 (EIHP2), March 2004.
- [13] Şenel, K. (2007), Hidrojenin yakıt olarak uçaklarda kullanımı. yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [14] <http://ram-home.com/ram-old/tu-155.html> [Accessed 06.11.2020]
- [15] Dincer, I., Acar, C. (2016). A review on potential use of hydrogen in aviation applications. International Journal of Sustainable Aviation, 2: 74-100.
- [16] <http://www.aerospace-technology.com/projects/hy4-aircraft/> [Accessed 06.11.2020].
- [17] Bicer, Y., Dincer, I. (2017). Life cycle evaluation of hydrogen and other potential fuels for aircrafts. International Journal of Hydrogen Energy, 42: 10722-10738
- [18] Bird, L. (2011). Dictionary of Business Continuity Management Terms. Business Continuity Institute. Available from: <http://www.thebci.org/glossary.pdf> [accessed on 27.12.15].
- [19] Molkov, V (2012). Fundamentals of hydrogen safety engineering, Part I and Part II. Available from: www.bookboon.com, free download e-book.
- [20] CEP, Clean Energy Partnership, 2014. Available from: <http://www.cleanenergypartnership.de/tech/site.php?l=en>
- [21] Barthelemy H, Weber M, Barbier F. Hydrogen storage: recent improvements and industrial perspectives. Int J Hydrogen Energy (2017) 42:7254-7262.
- [22] Norwegian parliament adopts zero-emission regulations in World Heritage fjords. <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/norway-adopts-zero-emission-regulations-in-world-heritage-fjords-24820> [accessed on 04.11.2020]
- [23] Harris, AP, Marchi CWS. (2012). Investigation of the hydrogen release incident at the AC transit Emeryville facility (Revised). Sandia report. SAND2012-8642.