



Programme européen de formation des formateurs pour le personnel de secours

Cours 1

Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

NIVEAU IV

Officier spécialiste

Les informations figurant dans ce cours sont destinées aux **officiers spécialistes**.

Ce sujet est également disponible pour les intervenants de niveau I (sapeur-pompier).

Ce cours fait partie d'un ensemble de supports de formation adressés aux intervenants de niveau I à IV : sapeur-pompier, chef d'agrès, commandant d'opération et officier spécialiste. Veuillez consulter l'introduction du cours relative aux attentes en matière de compétences et d'apprentissage.

Remarque : ces documents sont la propriété du Consortium HyResponder et doivent être reconnus comme tels ; les résultats d'HyResponse ont servi de base.



Clause de non-responsabilité

Malgré le soin apporté à la préparation du présent document, la clause de non-responsabilité suivante s'applique : les informations figurant dans le présent document sont fournies telles quelles et aucune garantie n'est donnée quant à leur adéquation à un usage particulier. L'utilisateur y a recours à ses propres risques et sous son entière responsabilité.

Ce document ne reflète que le point de vue de ses auteurs. L'entreprise commune PCH et l'Union européenne ne sont pas responsables de l'usage qui pourrait être fait des informations qu'il contient.

Remerciements

Ce projet a reçu un financement de la Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (aujourd'hui dénommée Clean Hydrogen Partnership) au titre de la Convention de subvention n° 875089. Cette entreprise commune est soutenue par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne, ainsi que par les organisations Hydrogen Europe et Hydrogen Europe Research.

Résumé

Ce cours est une introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours. Dans l'industrie, cela fait longtemps que l'hydrogène est largement utilisé sous forme de gaz comprimé ou sous forme liquéfiée. L'hydrogène n'est ni plus ni moins dangereux que les autres combustibles courants, mais il est différent, présentant ses propres caractéristiques ainsi que les risques associés. L'utilisation croissante des applications de piles à combustible et à hydrogène (PCH) nécessite de bien comprendre les processus, les dangers et les risques, les caractéristiques et les concepts de sécurité. En outre, le personnel doit être dûment formé pour pouvoir faire face à d'éventuels incidents ou accidents en toute sécurité. Cela requiert de faire évoluer la culture de la sécurité, en particulier pour le personnel de secours qui est le premier à faire face aux situations d'urgence pouvant impliquer de l'hydrogène sous pression ou liquéfié, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur, dans les zones résidentielles urbaines, sur les routes, à la campagne et dans bien d'autres contextes différents.

Ce cours donne un aperçu de l'infrastructure et des systèmes à PCH. Les dangers potentiels, les risques, les mesures de sécurité et les concepts associés aux applications de PCH stationnaires et de transport ont été pris en compte. Ce cours passe également en revue les principales utilisations de l'hydrogène, les principales méthodes de production, les options de stockage et les modes de distribution. En outre, il aborde les grands principes d'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène.

Nous nous sommes référés au projet HyResponse et les documents présentés ici sont fondés sur les cours HyResponse originaux (<http://www.hyresponse.eu>).

Mots-clés

Piles à combustible, hydrogène, production, stockage, application, sécurité de l'hydrogène, e-Laboratoire

Table des matières

Résumé.....	3
Mots-clés	3
1. Public cible	6
1.1 Description du rôle : spécialiste	6
1.2 Niveau de compétence : spécialiste.....	6
1.3 Apprentissage préalable : spécialiste.....	6
2. Introduction, champ d'application et objectif.....	6
3. Vue d'ensemble de la production, du stockage et de l'utilisation industrielle d'H ₂	8
3.1 Production d'hydrogène.....	8
3.1.1 Électrolyse de l'eau	8
3.1.2 Électrolyseurs à membrane échangeuse de protons.....	9
3.1.3 Électrolyseurs alcalins	11
3.1.4 Technologies de reformage.....	14
3.1.5 Autres technologies.....	15
3.1.6 Production décentralisée d'hydrogène	16
3.2 Stockage de l'hydrogène.....	16
3.3 Utilisation de l'hydrogène dans l'industrie	19
4. Véhicules à pile à combustible.....	19
4.1 Les principales caractéristiques des véhicules à pile à combustible	20
4.2 Voitures à pile à combustible	21
4.2.1 Système de stockage de l'hydrogène.....	22
4.2.2 Système d'alimentation en hydrogène en tant que combustible	22
4.2.3 Système de pile à combustible	22
4.2.4 Propulsion électrique et système de gestion de l'énergie.....	23
4.2.5 Caractéristiques et concepts de sécurité.....	23
4.3 Bus à pile à combustible.....	25
4.4 Chariots élévateurs à pile à combustible	28
4.5 Aviation.....	30
4.5.1 L'hydrogène en tant que carburant de propulsion	31
4.5.2 Les piles à combustible à hydrogène dans les applications aéronautiques.....	33
5. Transport d'hydrogène	35
5.1 Poids lourds (PL).....	35
5.1.1 Camions à gaz	35

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

5.1.2	Camions à liquides cryogéniques.....	38
5.2	Trains.....	39
5.3	Pipelines	40
6.	Applications stationnaires	44
6.1	Systèmes de production combinée de chaleur et d'électricité (PCCE)	44
6.2	Production d'énergie de secours	44
7.	Applications marines.....	47
8.	Systèmes de stockage d'énergie à base d'hydrogène.....	51
9.	Vue d'ensemble des incidents et des accidents	56
9.1	Incidents et accidents sur les systèmes et infrastructures de piles à combustible à hydrogène (PCH)	56
9.2	Accidents survenus dans le cadre de la production d'hydrogène	57
9.3	Incident survenu dans une station-service.....	57
10.	Présentation du cadre et des normes d'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène	58
11.	Présentation de l'e-Laboratoire	62
11.1	Principes scientifiques	63
11.1.1	Libérations non enflammées	63
11.1.2	Loi de similitude	64
11.1.3	Effet de flottabilité	65
11.1.4	Purge	66
11.1.5	Ventilation passive.....	67
11.1.6	Ventilation forcée.....	68
11.1.7	Phénomène de pic de pression	68
11.1.8	Distances de sécurité liées au jet enflammé.....	69
11.1.9	Atténuation des déflagrations	71
11.1.10	Onde de choc et boule de feu suite à la rupture d'un réservoir dans le contexte d'un incendie	72
11.2	Récapitulatif de l'e-Laboratoire	72
	Références	73

1. Public cible

Les informations figurant dans ce cours sont destinées aux officiers spécialistes. Ce cours est également disponible pour les intervenants de niveau I : sapeur-pompier.

La description du rôle, le niveau de compétence et les attentes en matière d'apprentissage relatifs aux officiers spécialistes sont décrits ci-après.

1.1 Description du rôle : spécialiste

Les officiers spécialistes assistent les commandants d'opération. Ils les conseillent, dirigent et supervisent les opérations techniques qui requièrent de mobiliser des connaissances, des compétences ou des équipements liés à un risque spécifique ou à une activité d'intervention. Les incidents classiques impliquent des matières dangereuses, des véhicules de transport, des phénomènes climatiques, des défaillances structurelles et d'autres défaillances de l'environnement bâti, ainsi que la logistique des interventions d'urgence.

1.2 Niveau de compétence : spécialiste

Une base scientifique, technique et empirique dans le domaine concerné ainsi que des compétences renforcées par l'expérience, permettant d'appliquer ces informations et connaissances en connaissance de cause, pour que le commandant d'opération et le personnel de secours sous la direction de l'officier spécialiste puissent réagir efficacement et en toute sécurité aux situations d'urgence.

1.3 Apprentissage préalable : spécialiste

CEC 5 Savoirs détaillés, spécialisés, factuels et théoriques dans un domaine de travail ou d'études, et conscience des limites de ces savoirs. Gamme étendue d'aptitudes cognitives et pratiques requises pour imaginer des solutions créatives à des problèmes abstraits. Gérer et superviser des activités dans un contexte de travail ou d'études où les changements sont imprévisibles ; examiner et améliorer ses résultats et ceux des autres.

2. Introduction, champ d'application et objectif

Le marché actuel propose des applications de piles à combustible et à hydrogène (PCH) dans les secteurs du transport et de l'énergie. Le personnel de secours sera fort probablement confronté à des accidents ou incidents dans un futur proche. En raison du développement des technologies de PCH, le personnel de secours doit parfaitement comprendre les dangers, les risques, les processus et les caractéristiques de sécurité associés aux systèmes et aux infrastructures de PCH. La production d'hydrogène par électrolyse et reformage de gaz naturel, les applications décentralisées de production d'hydrogène, le stockage de l'hydrogène gazeux et liquéfié, les applications de transport et de manutention de l'hydrogène, les véhicules à pile à combustible (voitures, bus, chariots élévateurs), les stations-service d'hydrogène, les applications stationnaires à pile à combustible et les systèmes de stockage de l'énergie à base d'hydrogène restent largement méconnus du personnel de secours. En outre, il n'existe pas de

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours
procédures d'intervention normalisées en cas d'accidents ou d'incidents survenant sur les systèmes et infrastructures susmentionnés.

Ce cours vise à présenter au personnel de secours un certain nombre d'applications de PCH, à le familiariser avec les risques spécifiques ainsi qu'à exposer les principales approches d'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène. Le personnel de secours doit comprendre que l'hydrogène n'est ni plus ni moins dangereux que les autres combustibles courants. L'hydrogène est simplement différent et la connaissance de ses propriétés spécifiques favorisera la prise de décisions éclairées en cas d'accident. Le personnel de secours doit être dûment formé pour pouvoir manipuler des systèmes d'hydrogène à des pressions pouvant aller jusqu'à 100 MPa et à des températures pouvant aller jusqu'à -253 °C (hydrogène liquéfié), aussi bien à l'extérieur qu'à l'intérieur.

Ce cours est le premier d'une série de cours. Il s'appuie sur les documents développés dans le cadre du projet HyResponse (<http://www.hyresponse.eu/>). Un Programme international de formation à la sécurité de l'hydrogène pour le personnel de secours a d'abord été élaboré dans le cadre dudit projet (<http://www.hyresponse.eu/curriculum.php>). Cela a constitué la première étape de la mise en place de la plateforme européenne de formation à la sécurité de l'hydrogène pour le personnel de secours. Ce programme a été développé dans le cadre du projet HyResponder (<https://hyresponder.eu>) afin de refléter l'état actuel des connaissances et de fournir des informations plus détaillées sur l'hydrogène liquéfié, les espaces confinés, les réservoirs sous pression, etc.

Les stagiaires sont invités à utiliser ce document lorsqu'ils réalisent des études indépendantes et qu'ils recherchent des sources d'informations complémentaires.

À l'issue de ce cours, les intervenants/stagiaires seront en mesure :

- D'apprécier la diversité et la richesse des technologies de PCH dans la société moderne ;
- De comprendre le rôle de l'hydrogène en tant que nouveau vecteur énergétique ;
- De citer les principales voies de production, de transport, de livraison et d'utilisation de l'hydrogène ;
- De reconnaître les difficultés de perception des technologies de l'hydrogène et des piles à combustible par le grand public ;
- De définir les principales méthodes de production industrielle de l'hydrogène. Bien que ce cours ne soit pas destiné à fournir des connaissances approfondies sur toutes les méthodes de production, il décrit de manière synthétique le reformage, les membranes échangeuses de protons et les électrolyseurs alcalins, en mettant l'accent sur les caractéristiques et les concepts de sécurité ;
- De décrire le principe de fonctionnement d'une pile à combustible (PC) et d'un bloc de piles à combustible ;

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

- D'expliquer les principes de fonctionnement et les aspects de sécurité d'une série d'applications de PCH, notamment les véhicules à pile à combustible, les stations-service, 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 de piles à combustible pour la production combinée de chaleur et d'électricité ;
- De donner des exemples d'incidents et d'accidents qui pourraient se produire dans le cadre des applications de PCH ;
- De donner un aperçu du cadre d'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène ;
- De connaître l'e-Laboratoire pour la sécurité de l'hydrogène ;
- De déterminer les conditions ou les paramètres essentiels en matière de sécurité pour une série de scénarios.

3. Vue d'ensemble de la production, du stockage et de l'utilisation industrielle d'H₂

3.1 Production d'hydrogène

Dans la nature, les molécules d'hydrogène ne se trouvent pas à l'état pur. Ainsi, l'hydrogène doit être produit à partir de composés dans lesquels 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 : la production centralisée à grande échelle et la production décentralisée à petite ou moyenne échelle. La production centralisée renvoie à des usines chimiques établies à grande échelle, produisant de l'hydrogène en masse, qui est ensuite transporté vers les clients. Dans ce cas, l'hydrogène est transporté, parfois sur de longues distances, par l'intermédiaire de pipelines, par la route ou par bateau. On peut citer à titre d'exemple les installations de reformage à la vapeur appartenant aux grandes compagnies gazières telles qu'Air Liquide, Linde, Air Products et bien d'autres encore. Plusieurs technologies éprouvées sont actuellement disponibles sur le marché de 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).

3.1.1 Électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau est un processus pendant lequel les molécules d'eau sont divisées en molécules d'hydrogène et d'oxygène à l'aide de l'énergie électrique, comme le montre l'équation (1) :



Ce processus se produit dans un électrolyseur qui convertit l'énergie électrique en énergie chimique et qui peut être considéré comme un dispositif fonctionnant à l'opposé d'une pile à combustible (PC). L'électricité peut provenir de différentes sources et, en fonction de celles-ci,

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

l'électrolyse peut avoir lieu avec ou sans émissions de dioxyde de carbone (CO₂). Si l'électricité est produite à partir de sources renouvelables (énergie éolienne, hydroélectrique, solaire ou marémotrice), les émissions de CO₂ sont nulles. Si elle est produite à partir de combustibles fossiles, la production d'hydrogène entraîne l'émission de CO₂ (même de loin). L'hydrogène gazeux produit est très pur et peut être utilisé immédiatement ou stocké en vue d'une utilisation ultérieure. La capacité des électrolyseurs varie de moins de 500 m³/h à plus de 3,3×10⁵ m³/h. L'électrolyseur contient deux électrodes (positive et négative), de l'eau et un électrolyte, à savoir une substance conductrice contenant des ions libres. La décomposition de l'eau a lieu lorsque le courant électrique passe entre deux électrodes à l'intérieur de la cellule électrolytique. L'hydrogène est produit au niveau de l'électrode négative (cathode) et l'oxygène est formé au niveau de l'électrode positive (anode).

3.1.2 Électrolyseurs à membrane échangeuse de protons

Lorsque l'électrolyse a lieu dans deux compartiments/chambres séparés par une membrane échangeuse de protons (MEP), il s'agit d'électrolyseurs à membrane échangeuse de protons. Sous l'effet d'un courant continu (CC), l'eau est dissociée en hydrogène (H₂) au niveau de l'électrode négative et en oxygène (O₂) au niveau de l'électrode positive (Figure 1). Les électrodes et la membrane forment généralement un ensemble membrane-électrode et un bloc similaire à un bloc de piles à combustible. Les gaz sont collectés dans les réservoirs de récupération. Les électrolyseurs à membrane échangeuse de protons fonctionnent à basse température et la membrane échangeuse de protons fait office d'électrolyte. Comme le montre la Figure 2, un électrolyseur à membrane échangeuse de protons se compose des éléments suivants :

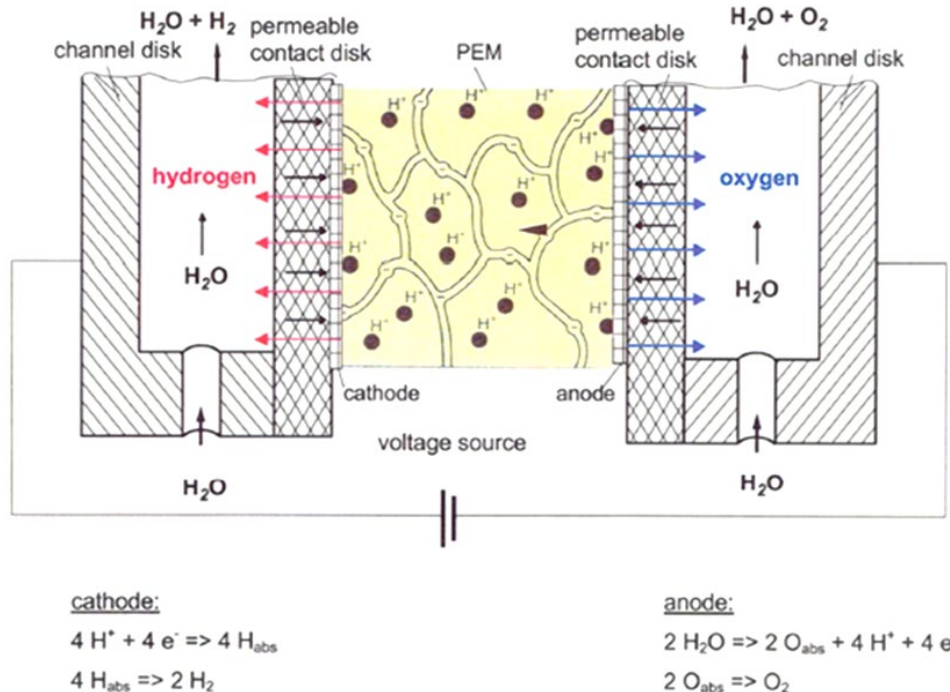
- une armoire de traitement contenant tous les composants de traitement tels que les vannes, les tuyaux, les gaz et l'eau, le bloc, les réservoirs sous pression, les pompes, etc. ;
- une armoire électrique contenant tous les composants électriques (c'est-à-dire l'équipement d'instrumentation et de contrôle, le câblage et l'équipement de conditionnement d'énergie) ;
- un système de refroidissement pour assurer la dissipation de la chaleur du processus d'électrolyse ;
- un boîtier étanche.

Les événements indésirables susceptibles de se produire sont liés à la formation d'un mélange explosif ATEX1 (c'est-à-dire d'un mélange H₂-O₂) dans le compartiment de traitement ou dans le séparateur (c'est-à-dire un dispositif permettant de séparer l'H₂ et l'O₂ gazeux des traces d'eau) généralement installé en aval du bloc de piles à combustible. Pour éviter l'accumulation d'hydrogène dans le compartiment de traitement, il convient de prendre les mesures suivantes :

- contrôler la pression et la différence de pression entre les conduites d'hydrogène et d'oxygène ;

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

- contrôler la concentration en hydrogène dans le réservoir ($< 0,4\%$ en volume d' H_2) ;
- limiter autant que possible la quantité d'hydrogène dans la couche de gaz du séparateur pour éviter la formation d'un mélange hydrogène-air inflammable dans le réservoir en cas de fuite catastrophique [1].



Source : Areva, 2015.

Figure 1. Principes de fonctionnement d'un électrolyseur à membrane échangeuse de protons. Un dysfonctionnement de la conduite de transfert d'eau ou une perforation de la membrane peut être à l'origine de la formation d'un mélange ATEX hydrogène-oxygène dans le séparateur. Les mesures de sécurité suivantes doivent être envisagées pour éviter la formation de tout mélange 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 les séparateurs d' H_2 et d' O_2 gazeux ;
- contrôler la pression et la différence de pression entre les conduites d' H_2 et d' O_2 ;
- contrôler la concentration en hydrogène à la sortie du séparateur d'oxygène gazeux.

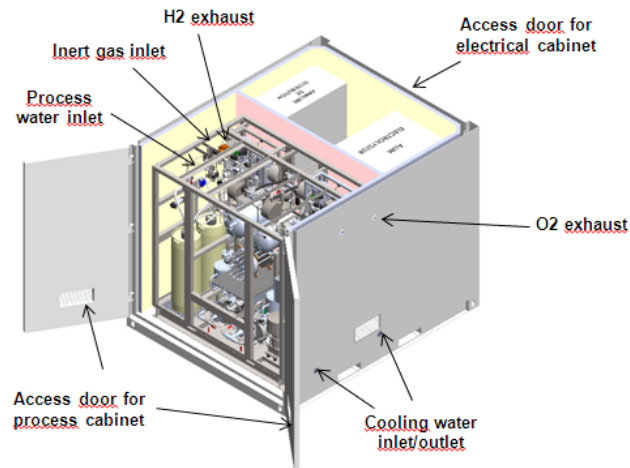


Figure 2. Schéma d'un électrolyseur à membrane échangeuse de protons [1]

En cas d'activation des dispositifs de sécurité, l'électrolyseur s'arrête, ce qui provoque non seulement la fermeture des électrovannes d'isolation raccordées aux réservoirs de stockage, mais également la dépressurisation du système par le biais des électrovannes normalement ouvertes. En outre, la mauvaise isolation des électrons peut entraîner des étincelles électriques pendant le fonctionnement en cas d'accident et, par conséquent, enflammer l'hydrogène dans les environnements riches en oxygène.

Le taux de production d'hydrogène des différents modèles d'électrolyseurs ITM Power, notamment les modèles HGas1SP, HGas2SP, HGas3SP et HGasXMW, varie entre 5,5 et 2 015 m³/h.

3.1.3 Électrolyseurs alcalins

L'électrolyse alcalin est une technologie de production d'hydrogène éprouvée. Il s'agit également de la technologie la plus utilisée de l'industrie. L'électrolyse alcalin utilise le même principe que l'électrolyse à membrane échangeuse de protons, à savoir la conversion de l'énergie électrique en énergie chimique. Un électrolyseur alcalin comporte deux électrodes immergées dans un électrolyte alcalin liquide, à savoir une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH) à une concentration allant de 25 % à 80 °C à 40 % à 160 °C. Du fait de sa conductivité ionique plus élevée, de sa teneur plus faible en impuretés de chlorure et de sa pression de vapeur saturée plus basse, il est préférable d'utiliser de l'hydroxyde de potassium plutôt que de la soude caustique (NaOH). Les électrodes sont séparées par un diaphragme, comme le montre la Figure 3. Ce diaphragme a deux fonctions : séparer les gaz produits (hydrogène et oxygène) et les isoler des ions hydroxyde (OH⁻) et des molécules d'eau. Le diaphragme laisse passer les ions mais pas l'hydrogène. En général, l'électrolyseur alcalin est composé d'un certain nombre de cellules électrolytiques constituées d'une membrane avec des électrodes insérées entre des plaques d'écoulement bipolaires, comme illustré sur la Figure 4.

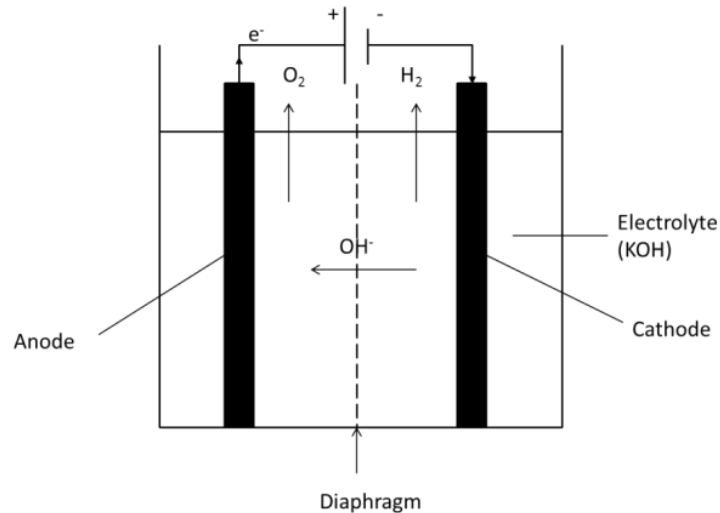


Figure 3. Schéma d'un électrolyseur alcalin [1]

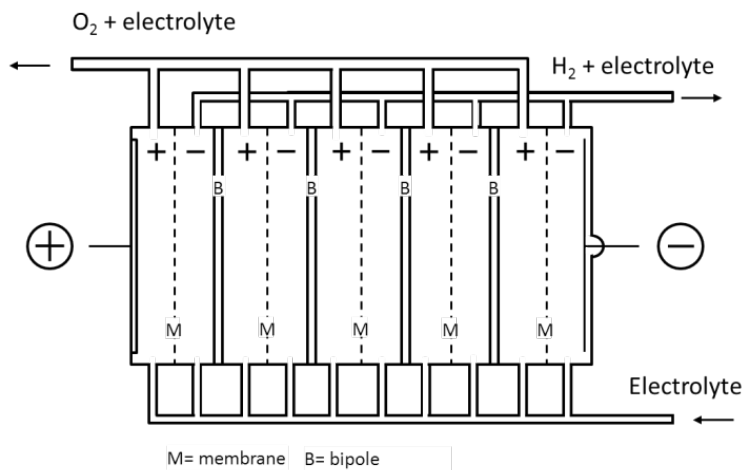
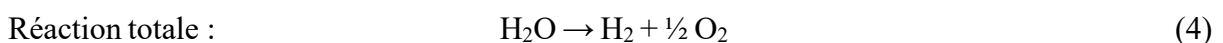
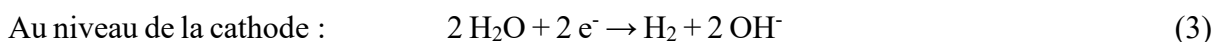
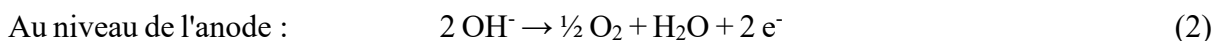


Figure 4. Schéma d'un bloc d'électrolyse [1]

Les réactions qui se produisent au niveau des deux électrodes sont illustrées ci-dessous :



Un électrolyseur alcalin classique se compose des éléments suivants :

- Une alimentation électrique et un système de contrôle et d'instrumentation ;
- Un système d'électrolyse contenant une unité de purification de l'eau, une unité de purification de l'hydrogène, un sécheur de gaz et un séparateur.
- Un compresseur.

La Figure 5 et la Figure 6 montrent des exemples d'électrolyseurs alcalins industriels.



Figure 5. Électrolyseur alcalin IHT type S-556, 760 m³/h et 30 bar [1]



Figure 6. Électrolyseurs extérieurs et intérieurs HySTAT de la société Hydrogenics, 10-60 m³/h [1]

À l'instar d'un électrolyseur à membrane échangeuse de protons, le principal risque du système d'électrolyse alcaline est lié à la formation d'un mélange hydrogène-oxygène susceptible d'entraîner une explosion interne dans l'électrolyseur. Plusieurs capteurs sont utilisés afin de détecter tout dysfonctionnement de l'électrolyseur :

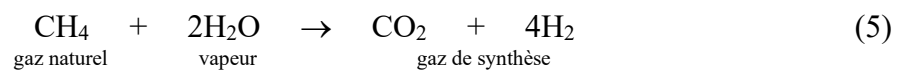
- mesure de la concentration en hydrogène dans la conduite d'oxygène ;
- mesure de la tension et du courant ;
- mesure de la température à l'entrée et à la sortie des cellules d'électrolyse ;
- mesure de la concentration ionique de l'électrolyte.

En cas de fuite d'électrolyte, l'exposition à une solution corrosive présente également un autre type de risque. La fiche technique de l'hydroxyde de potassium recommande d'utiliser un

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours
réservoir antifuite afin d'éviter tout contact entre l'hydroxyde de potassium et l'environnement [1].

3.1.4 Technologies de reformage

Actuellement, le reformage à la vapeur de gaz naturel constitue la méthode de production d'hydrogène la plus courante. La réaction de reformage du gaz naturel (méthane CH₄) est indiquée dans l'équation 5 :



Il s'agit d'un processus endothermique (c'est-à-dire qui requiert des températures élevées) de conversion du méthane et de la vapeur en hydrogène et en dioxyde de carbone CO₂. Ce processus a généralement lieu en deux étapes, les sous-produits typiques du reformage étant le monoxyde de carbone CO et le dioxyde de carbone CO₂. Une installation de reformage peut fonctionner 24 heures sur 24, 7 jours sur 7, à charge constante. La capacité des installations de reformage varie entre 100 et plus de 100 000 m³/h. L'efficacité d'une installation de reformage dépasse rarement 80 %. L'inconvénient de cette méthode est que l'hydrogène produit n'est pas pur (il est contaminé par du CO/CO₂) et qu'il est à la pression atmosphérique. Pour améliorer la durabilité du processus de reformage, il convient de capter et de séquestrer le CO₂. Un exemple d'installation de reformage à la vapeur est illustré sur la Figure 7.

Le reformage à la vapeur est un processus industriel éprouvé. Nous ne l'aborderons pas de manière plus détaillée dans ce cours. Pour obtenir de plus amples informations d'ordre technique, veuillez vous reporter aux documents relatifs à la sécurité dans les industries de reformage fournis dans le Programme international de formation à la sécurité de l'hydrogène pour le personnel de secours. Comme indiqué précédemment, le processus se déroule à haute température et à haute pression. Bien entendu, les problèmes de sécurité liés à l'hydrogène qui seront abordés dans les prochains cours (par exemple les fuites, les incendies, la détection, l'atténuation, etc.) sont également pertinents vis-à-vis du reformage à la vapeur.



Figure 7. Installation de reformage à la vapeur AirLiquide [1]

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

3.1.5 Autres technologies

Ce cours passe en revue les méthodes de production d'hydrogène non conventionnelles. Le personnel de secours doit connaître les différentes méthodes de production d'hydrogène, car le marché des piles à combustible et à hydrogène se développe rapidement. Pour obtenir de plus amples informations sur les technologies alternatives de production d'hydrogène, veuillez utiliser les références issues du Programme international de formation à la sécurité de l'hydrogène pour le personnel de secours.

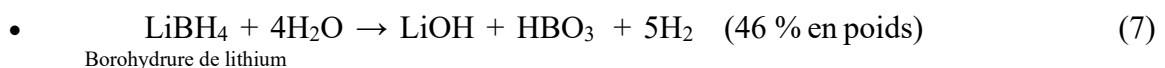
L'hydrogène peut être produit - à partir de l'eau par le biais des processus suivants :

- Les méthodes nucléaires (radiolyse ou thermolyse) ;
- La photoélectrolyse (systèmes photovoltaïques couplés à des électrolyseurs) ;
- Le cycle thermochimique ;
- La méthode du ferrosilicium (eau, hydroxyde de sodium et ferrosilicium) ;
- Le fractionnement photobiologique de l'eau (en deux étapes : la photosynthèse et la production d'hydrogène catalysée par des hydrogénases) ;
- Le fractionnement photochimique de l'eau ;
- Les voies biologiques (fermentation, enzymatique, microbiologique et biocatalytique).

- à partir de combustibles fossiles par le biais des processus suivants :

- L'oxydation partielle du pétrole ;
- La gazéification du charbon ;
- Le reformage au plasma (hydrocarbures légers chauffés par le plasma à 1 600 °C et produisant de l'hydrogène et du carbone, mais pas d'émissions de CO₂) ;
- Le reformage à sec (gaz naturel reformé dans le flux de CO₂).

- à partir d'hydrures métalliques complexes :



Ces hydrures métalliques complexes font actuellement l'objet de recherches approfondies en vue de développer de nouveaux matériaux adaptés au stockage d'hydrogène à l'état solide.

Par le passé, l'hydrogène était produit par le biais de technologies de reformage. Ces dernières ne sont pas écologiques du fait de la production de dioxyde de carbone. Bien que l'hydrogène produit à partir du gaz naturel représente certainement une option viable à court terme, il n'est pas envisagé comme une solution à long terme. Il est prévu que des modes de production plus

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

écologiques, tels que l'électrolyse et les méthodes nucléaires, jouent un rôle de plus en plus important. Les ressources renouvelables utilisées pour produire de l'hydrogène comprennent la biomasse, le méthanol, l'éthanol et le gaz de décharge, les parcs éoliens, l'énergie marémotrice, l'énergie hydroélectrique, l'énergie solaire et l'énergie gravitationnelle. Alors que les énergies renouvelables commencent à gagner en importance pour satisfaire les besoins énergétiques de la société moderne, les questions de l'équilibrage du réseau et du stockage de l'énergie font l'objet de nombreuses recherches ; c'est là que l'hydrogène, en tant que nouveau vecteur énergétique, entre en jeu. L'énergie éolienne ou solaire a été associée à la production et au stockage d'hydrogène dans le cadre d'un certain nombre de projets, par exemple le projet Pure (Écosse), la plateforme MYRTE (Corse, France), la centrale de Puertollano (Ciudad Real, Espagne), la centrale éolienne et à hydrogène d'Utsira (île d'Utsira, Norvège) et plusieurs projets de PCH, par exemple les projets SOPHIA, PECDEMO, HYDROSOL-PLANT ainsi que d'autres.

3.1.6 Production décentralisée d'hydrogène

La production décentralisée (ou distribuée) d'hydrogène renvoie à des systèmes mis en œuvre à différentes échelles, d'une communauté insulaire à un électrolyseur domestique destiné à un usage personnel. L'évolution vers une production décentralisée pourrait aboutir à l'indépendance énergétique pour l'utilisateur final. Cependant, cela signifie également qu'il convient de redéfinir la « culture de la sécurité », car le grand public aura davantage de responsabilités. Quelques exemples de systèmes domestiques ont été présentés par Honda et IMT :

- Station d'énergie domestique Honda :
<https://apps.honda.co.uk/environment/designingthefuture/homeenergystation/>
- Système domestique ITM :
<https://www.itm-power.com/h2-stations>

3.2 Stockage de l'hydrogène

Cette section passe en revue les différentes options de stockage de l'hydrogène. Les fuites d'hydrogène, les incendies, les explosions ainsi que l'interaction de l'hydrogène avec les matériaux utilisés pour fabriquer les réservoirs de stockage sont des thèmes extrêmement importants ; ils seront abordés dans les cours suivants. 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 de l'hydrogène doit être sélectionnée pour convenir à une application spécifique. À titre d'exemple, la taille et le poids sont des facteurs restrictifs pour les véhicules de tourisme, tandis que le poids peut être un atout dans le cas des chariots élévateurs. Les solutions de stockage constituent l'un des principaux défis de l'économie de

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

l'hydrogène. Ces technologies suscitent un intérêt considérable tant dans les communautés scientifiques qu'industrielles.

Le stockage de grandes quantités d'hydrogène pendant de longues périodes est une étape clé de la mise en place de l'infrastructure de 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. L'une des options consiste à stocker l'hydrogène gazeux dans des formations géologiques telles que des gisements de gaz épuisés, des aquifères ou des cavernes de sel. Une autre option consiste à stocker l'hydrogène dans des réservoirs enfouis sous terre ; soit sous forme de gaz comprimé, soit sous forme liquide. Les dispositifs de stockage géologique sont généralement situés 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-service.

De nombreuses technologies de stockage de l'hydrogène sont disponibles. Elles peuvent être classées dans les catégories suivantes :

- Stockage de gaz comprimés
- Stockage de gaz liquéfiés
- Stockage à l'état solide

Le plus souvent, l'hydrogène sous forme de gaz comprimé ou de liquide cryogénique est stocké dans des cylindres ou des réservoirs métalliques ou composites (Figure 8). La technologie de cryocompression, qui consiste à refroidir à basse température de l'hydrogène gazeux sous haute pression, représente une autre alternative. Les cylindres peuvent présenter différentes tailles, capacités (de 20 à 300 L) et pressions (de 20 à 70 MPa). Dans le cadre de certaines applications de transport, ils sont parfois regroupés en faisceau ou rassemblés sur un panier.



a



b



c

Figure 8. Stockage embarqué d'hydrogène (a), faisceau de cylindres (b) et panier de cylindres pour le transport (c).

L'hydrogène gazeux peut être comprimé à une pression comprise entre 20 et 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

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

au stockage de l'hydrogène à des pressions aussi élevées, ainsi que les coûts et le poids supplémentaires des cylindres conçus 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, ces problèmes peuvent être plus importants à des pressions plus élevées. En Europe, la plupart des cylindres transportables ne disposent que d'une simple vanne faisant office de dispositif de sécurité. Aux États-Unis, les cylindres transportables sont équipés de dispositifs de décompression. Cette prescription est très controversée car ces dispositifs sont souvent à l'origine de fuites. Le stockage de l'hydrogène gazeux comprimé est généralement intégré aux systèmes de stockage d'hydrogène stationnaires et de stockage embarqué de l'hydrogène dans les véhicules à pile à combustible [1].

L'hydrogène cryogénique, qui se forme lorsque l'hydrogène est refroidi à une température inférieure à son point d'ébullition de 20 K (-253 °C), constitue 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 à l'intérieur de la structure ou à la surface de certains matériaux solides. Contrairement aux deux méthodes précédentes, cette option de stockage ne nécessite pas de hautes pressions ni de basses températures, 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 9a) et les réactions chimiques (Figure 9, b-d). Des exemples de matériaux et de composés adaptés au stockage de l'hydrogène solide sont présentés sur la Figure 9 ci-dessous.

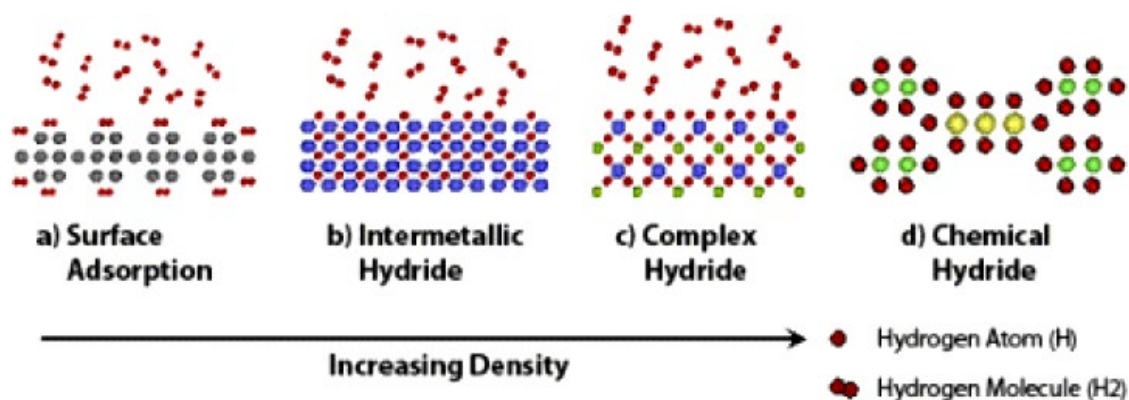


Figure 9. Matériaux utilisés pour le stockage d'hydrogène à l'état solide [2]

Ces trois options présentent leurs propres avantages et inconvénients. Les problèmes de sécurité diffèrent également et seront abordés en détail dans le cours 3 intitulé « 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 sur site (sous le sol ou au-dessus du sol) ou en tant que réservoirs de stockage embarqués dans les véhicules à pile à combustible.

3.3 Utilisation de l'hydrogène dans l'industrie

Depuis plus de 100 ans, l'hydrogène est utilisé dans l'industrie et stocké en toute sécurité sous forme de gaz comprimé ou liquéfié. L'hydrogène est largement utilisé pour toute une série d'applications, notamment : le raffinage du pétrole brut ; en tant qu'agent de refroidissement dans les turbines génératrices d'électricité ; en tant qu'agent propulseur dans les applications liées aux fusées et aux missiles ; lors de 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, pharmaceutiques, pétrochimiques, chimiques et alimentaires, 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 dans le cadre de la production et de l'utilisation finale de l'hydrogène. Cette tendance pourrait toutefois changer dans les années à venir en raison de l'essor des applications de PCH dans le domaine public et de l'utilisation plus fréquente des technologies de PCH par des particuliers n'ayant pas suivi de formation spécifique en matière de sécurité. Les rapports d'incidents montrent également que, sur le nombre total d'incidents enregistrés à ce jour, seule une petite proportion a entraîné des pertes humaines (4,6 %) [4]. Bien que l'industrie ait maîtrisé efficacement les problèmes de sécurité liés à l'hydrogène jusqu'alors, 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 des combustibles domestiques, principalement en raison des pressions élevées utilisées pour le stockage de l'hydrogène. L'hydrogène n'est ni plus ni moins dangereux que les autres combustibles inflammables, par exemple l'essence et le gaz naturel. En fait, certaines de ses propriétés telles que la flottabilité offrent des avantages en termes de sécurité par rapport aux autres combustibles. 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 certaines conditions. L'hydrogène peut être manipulé en toute sécurité à condition de respecter des directives simples et à condition que l'utilisateur soit familiarisé avec son comportement unique. La compréhension des propriétés spécifiques de l'hydrogène et la connaissance des applications de PCH permettent d'utiliser l'hydrogène en tant que combustible en toute sécurité. Dans notre société, il est nécessaire d'instaurer une nouvelle culture de la sécurité, de développer des stratégies de sécurité innovantes ainsi que des solutions techniques révolutionnaires. On estime que l'utilisation de l'hydrogène présente un degré de sécurité similaire ou supérieur à celui de l'utilisation des combustibles fossiles. Ainsi, les paramètres de sécurité des produits à base d'hydrogène et de piles à combustible détermineront directement leur compétitivité sur le marché [5].

4. Véhicules à pile à combustible

Les technologies de PCH destinées aux véhicules routiers et aux véhicules spécialisés revêtent aujourd'hui une grande importance. Certains constructeurs automobiles, par exemple Toyota,

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

ont déjà lancé la vente de véhicules à pile à combustible et à hydrogène dans les régions où l'infrastructure de ravitaillement le permet. Parmi les exemples de véhicules routiers, on peut citer les véhicules de tourisme, les bus, les scooters, les camions légers, etc. Ils utilisent l'hydrogène en tant que carburant et ne comportent pas de moteur à combustion interne, ce dernier étant remplacé par la pile à combustible et le moteur électrique. La disponibilité de l'infrastructure est une étape clé vers le succès commercial de ces produits. En apparence, ces véhicules sont similaires aux véhicules classiques. Toutefois, contrairement aux véhicules classiques, ils n'émettent pas d'émissions polluantes et sont très silencieux lorsqu'ils fonctionnent. Les véhicules spécialisés constituent une autre application importante. Ils sont conçus à des fins spécifiques et fonctionnent généralement en flotte. Les chariots élévateurs à pile à combustible sont un bon exemple de véhicules spécialisés. Ce type de véhicule 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 pile à combustible ainsi que dans une infrastructure de ravitaillement, car elles tirent presque immédiatement parti de leur exploitation.

4.1 Les principales caractéristiques des véhicules à pile à combustible

Les voitures à pile à combustible présentent un groupe motopropulseur électrique alimenté par une pile à combustible. Cette dernière produit de l'électricité par réaction électrochimique en utilisant de l'hydrogène. Bien qu'il existe une grande variété de prototypes de voitures à pile à combustible, les caractéristiques clés suivantes (Figure 10) sont communes à la plupart d'entre eux [6] :

- Système de ravitaillement en hydrogène ;
- Système de stockage de l'hydrogène ;
- Système d'alimentation en hydrogène en tant que combustible ;
- Système de pile à combustible ;
- Propulsion électrique et système de gestion de l'énergie.

Lors du 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 est stocké dans le système de stockage de l'hydrogène, généralement sous forme de gaz comprimé. 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 d'alimentation en hydrogène (C) réduisent la pression au niveau approprié pour assurer le bon fonctionnement de la pile à combustible. L'hydrogène est combiné électrochimiquement avec de l'oxygène dans le système de pile à combustible (D) afin de 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 pour charger les batteries et les condensateurs haute capacité.

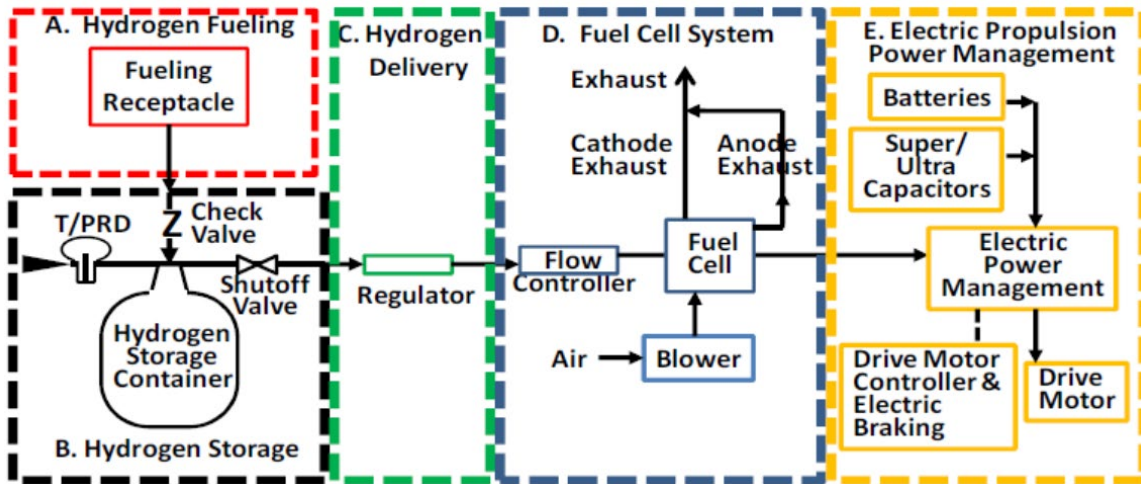


Figure 10. Les systèmes clés d'une voiture à pile à combustible [6]

4.2 Voitures à pile à combustible

La Figure 11 illustre la disposition typique des principaux composants d'une voiture à pile à combustible [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 le système de gestion de l'énergie, le contrôleur du moteur d'entraînement et les moteurs d'entraînement. Compte tenu de la taille et du poids des batteries de traction et des condensateurs haute capacité, ces composants sont généralement situés dans la voiture afin de conserver l'équilibre de poids souhaité pour assurer une bonne maniabilité de la voiture.

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

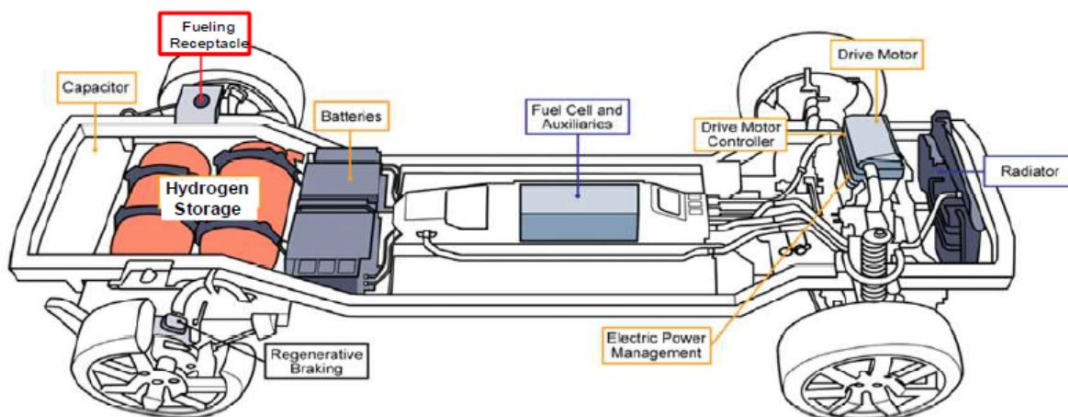


Figure 11. Exemple de voiture à pile à combustible [6]

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

4.2.1 Système de stockage de l'hydrogène

Les principales fonctions du système de stockage de l'hydrogène sont de recevoir de l'hydrogène pendant le ravitaillement, de le contenir tant qu'il n'est pas utilisé, puis de le libérer dans le système de pile à combustible afin d'alimenter la voiture. Actuellement, la méthode la plus courante de stockage et de fourniture d'hydrogène en tant que combustible est sous forme de gaz comprimé (CGH_2). Des cylindres de gaz comprimé légers et pressurisés à 700 bar ont été développés afin d'augmenter la capacité de stockage. Ils se composent d'un liner métallique (réservoir de type III) ou en polymère (réservoir de type IV) placé dans une structure composite renforcée de fibres (Figure 12). Les travaux visant à réduire les coûts de ces cylindres se poursuivent. De plus amples informations relatives aux systèmes de stockage d'hydrogène embarqués seront disponibles dans les cours suivants.



Figure 12. 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 hydrogène en tant que combustible

Le système d'alimentation en hydrogène en tant que combustible transfère l'hydrogène du système de stockage au système de propulsion, à la pression et à la température adéquates pour que la pile à combustible fonctionne. Pour ce faire, il utilise une série de vannes de contrôle de débit, de régulateurs de pression, de filtres, de conduites de carburant (tuyaux) et d'échangeurs thermiques. La plupart des conduites de carburant sont de couleur argentée, mais elles peuvent parfois être rouges. Si le réservoir est fermé à la suite d'un incident, seule une petite quantité d'hydrogène se trouvera dans ces conduites. Toutefois, le personnel de secours ne doit pas couper les conduites de carburant pendant les procédures de désincarcération.

4.2.3 Système de pile à combustible

Le système de 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. Dans les applications automobiles, les piles à combustible à membrane échangeuse de protons sont les plus couramment utilisées en raison de leur température de fonctionnement plus basse, qui permet des temps de démarrage plus courts. Les piles à combustible à membrane échangeuse de protons combinent électrochimiquement l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'énergie électrique. Lorsqu'elles sont alimentées en hydrogène et en oxygène, les piles à combustible sont capables

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

de produire de l'électricité en continu, 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 CC. 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 l'énergie

L'énergie électrique produite par le système de pile à combustible (bloc 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 nombreux véhicules de tourisme à pile à combustible sont à traction avant, le moteur électrique et le groupe motopropulseur étant situés dans le « compartiment moteur » et montés transversalement au-dessus de l'essieu avant. Toutefois, certaines autres configurations et la traction arrière représentent également des options viables. Les véhicules à 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 compact sur chaque roue. La batterie haute tension se trouve généralement dans un boîtier métallique et est solidement fixée au cadre. Différents véhicules à pile à combustible utilisent différentes sortes de batteries, telles que les batteries nickel-hydrure métallique ou les batteries lithium-ion. Parmi les autres composants haute tension, on peut citer le contacteur de la pile à combustible, l'unité de contrôle de la tension de la batterie, le convertisseur CC-CC, l'unité d'entraînement de puissance et le chauffage électrique. L'électricité provenant du bloc de piles 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 les distributeurs de carburant des stations-service, qui peut être raccordé au réceptacle de ravitaillement de la voiture pour assurer le 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 sur la [Figure 13](#). Le système comprend le réservoir et tous les autres composants formant « 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 ;

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

- Une vanne d'arrêt ;
- Un dispositif de décompression thermique (DDT).

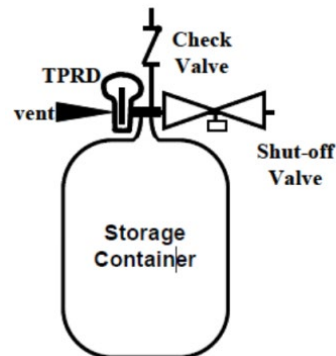


Figure 13. Système de stockage d'hydrogène comprimé type [6]

Pendant le ravitaillement, l'hydrogène entre dans le système de stockage par un clapet anti-retour. Ce clapet anti-retour empêche le reflux de l'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 requiert d'isoler le système de stockage de l'hydrogène. En cas d'incendie, les dispositifs de décompression thermique (DDT) assurent une libération contrôlée du gaz des réservoirs de stockage d'hydrogène comprimé avant que les températures élevées de l'incendie ne fragilisent les parois des réservoirs et ne provoquent leur rupture. Les dispositifs de décompression thermique sont conçus pour évacuer rapidement tout le contenu du réservoir. Ils ne se referment pas et ne permettent pas de remettre le réservoir sous pression. Les réservoirs de stockage et les dispositifs de décompression thermique qui ont été exposés à un incendie doivent être mis hors service et détruits. L'hydrogène est généralement (mais pas toujours) évacué à l'extérieur du véhicule à pile à combustible par le biais d'une conduite d'évacuation. L'emplacement exact de ces conduites d'évacuation dépend du constructeur et du modèle du véhicule. Généralement, elles se trouvent à l'arrière du véhicule, près du réservoir d'hydrogène [6]. Le système d'alimentation en combustible doit réduire la pression du système de stockage de l'hydrogène jusqu'aux valeurs requises par le système de pile à combustible. Dans le cas d'un système de stockage d'hydrogène comprimé présentant une pression de service nominale de 70 MPa, par exemple, il se peut que la pression doive passer de 87,5 MPa à moins de 1 MPa à l'entrée du système de pile à combustible. L'obtention d'un contrôle précis et stable et la protection contre la surpression des équipements en aval en cas de défaillance du régulateur de pression peuvent nécessiter plusieurs étapes de régulation de la pression. Le système d'alimentation en combustible peut être protégé contre la surpression en évacuant l'excès d'hydrogène gazeux par des soupapes de décompression ou en isolant l'alimentation en hydrogène gazeux (c'est-à-dire en fermant la vanne d'arrêt du système de stockage de l'hydrogène) lorsqu'une surpression est détectée en aval [6]. Un certain nombre de capteurs d'hydrogène se trouvent dans les véhicules à pile à combustible. Lorsqu'une fuite d'hydrogène potentiellement dangereuse est détectée, le

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

contrôleur du système interrompt automatiquement le flux d'hydrogène du réservoir. Les capteurs peuvent se trouver à plusieurs endroits : sur le tableau de bord, à côté des réservoirs de stockage 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 activé, ces capteurs surveillent en permanence la concentration en hydrogène dans ces zones. Par exemple, selon la procédure opérationnelle normalisée américaine, lorsque de l'hydrogène est détecté à un « niveau d'avertissement », l'icône « H₂ » apparaît sur le tableau de bord et le centre d'information du conducteur affiche le message « H₂ détecté ». Si l'hydrogène est détecté à un « niveau d'alarme », l'icône « H₂ » clignote, un signal sonore retentit et le message « H₂ détecté - Évacuer le véhicule » apparaît sur le centre d'information du conducteur [7]. Il convient de noter que différentes normes correspondant à différents niveaux de danger sont appliquées selon les pays, bien que les procédures opérationnelles normalisées générales soient similaires. Selon les pays, des concentrations en hydrogène différentes déclenchent des niveaux d'alerte différents.

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. Le bloc de piles à combustible est situé dans le compartiment moteur arrière. Le bloc de piles à combustible d'un bus est plus gros que celui d'une voiture à pile à combustible et produit une tension plus élevée, de l'ordre de 600 V. Par rapport aux bus classiques, les principaux avantages des bus à pile à combustible 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. Plusieurs projets européens sont associés au transport à base d'hydrogène. Par exemple, le Clean Energy Partnership (CEP) [8] est un projet visant à tester et à démontrer l'utilisation des technologies de PCH dans les applications de transport. Créé en 2002, le CEP est une coopération internationale de 18 partenaires, dont des constructeurs automobiles de premier plan tels que le groupe BMW, Honda, Daimler, Ford, Hyundai, GM/Opel, Toyota et Volkswagen. En 2011, le CEP est passé à sa troisième phase, la « préparation du marché ». Il y a également le projet HyFLEET : CUTE, qui vise à développer et à exploiter la plus grande flotte de bus à pile à combustible au monde. Le projet HyFLEET : CUTE a permis d'exploiter 47 bus à hydrogène dans le cadre des services de transports publics de 10 villes réparties sur trois continents (Amsterdam, Barcelone, Pékin, Hambourg, Londres, Luxembourg, Madrid, Perth, Reykjavik) [9]. Étant utilisés en continu dans des conditions difficiles, voire parfois dans des conditions climatiques extrêmes, ces bus ont fourni des données très utiles aux développeurs et aux opérateurs. Ce projet a également permis de familiariser le grand public avec cette nouvelle technologie et de gagner son adhésion [9]. Londres dispose désormais d'une flotte de 8 bus à pile à combustible qui circulent sur la ligne RV1 entre Covent Garden et Tower Gateway (Figure 14). Le projet JIVE (Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe) de la

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

FCH JU (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking), prévu pour durer six ans à compter de janvier 2017, vise à déployer 139 nouveaux bus à pile à combustible zéro émission et les infrastructures de ravitaillement associées dans cinq pays. Le projet JIVE2, lancé en janvier 2018 conjointement au projet JIVE, permettra de déployer près de 300 bus à pile à combustible dans 22 villes européennes d'ici le début des années 2020 ; il s'agira du plus grand déploiement réalisé en Europe à ce jour. (<https://www.fuelcellbuses.eu/public-transport-hydrogen/jivejive2mehrlin-leaflet>)



Figure 14. 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 les moteurs 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 hybride, dans lesquels un dispositif de stockage d'énergie (batterie ou condensateur haute capacité) est inclus dans la chaîne cinématique afin de réduire les charges de pointe et de permettre le freinage par récupération » [10]. L'étude réalisée dans le cadre du projet NextHyLights compare brièvement les principales technologies de bus à hydrogène [10]. La Figure 15 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 [12] a effectué des recherches sur la pression optimale de stockage embarqué qui serait nécessaire pour les bus équipés de réservoirs de CGH₂. Il a conclu qu'un dispositif normalisé de limitation de la pression de stockage embarqué était nécessaire pour s'assurer de ne pas recharger un véhicule 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 d'endommagement des interfaces de ravitaillement en raison de leur incompatibilité. Pour une masse donnée d'hydrogène, l'énergie de compression du gaz dans un réservoir augmente conjointement à la pression de stockage. Par conséquent, une expansion soudaine du gaz due à la rupture du réservoir pourrait avoir des conséquences graves qui augmenteraient proportionnellement à la pression. Ainsi, lorsque l'on envisage des systèmes de stockage pour

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

les bus, vis-à-vis desquels le volume n'est pas une contrainte aussi importante que pour les voitures, on constate que les pressions optimales se situent entre 20 et 35 MPa pour les bus de ville non articulés à un étage [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 est un dispositif thermique non refermable, conçu pour éviter qu'un réservoir d'hydrogène sous pression ne subisse 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 qu'il se peut que les incendies provoquant l'ouverture d'un dispositif de décompression n'entraînent pas l'inflammation immédiate de l'hydrogène lors de sa libération. Les réservoirs d'hydrogène sont équipés de dispositifs de décompression thermique (DDT) ainsi que de conduites de combustible et d'évacuation en acier inoxydable. Un premier bouton d'arrêt d'urgence se trouve sur le tableau de bord du poste de conduite et un autre sur la pile à combustible elle-même, dans le compartiment moteur.

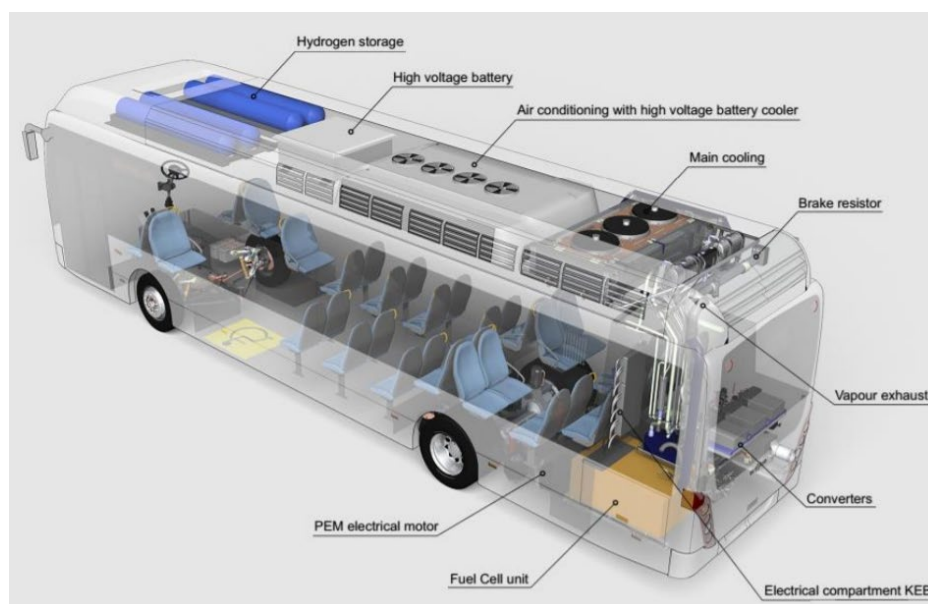


Figure 15. Disposition des principaux composants d'un bus à pile à combustible [11]

Le personnel de secours doit apprendre à gérer les véhicules à pile à combustible en cas d'accident de la circulation. Les principaux dangers sont liés à la haute tension (jusqu'à 600 V) ainsi qu'à des pressions de gaz élevées (jusqu'à 70 MPa). Pour les différents types de véhicules routiers, le règlement CE 79/2009, conjointement au règlement CE 406/2010, exige d'étiqueter les véhicules à pile à combustible. Pour les véhicules légers, l'étiquette doit être placée de manière visible près du réceptacle de ravitaillement (une autre étiquette doit se trouver dans le compartiment moteur). Des travaux devraient bientôt permettre de mettre à jour les directives dans ce domaine. Le personnel de secours est invité à confirmer les exigences en matière d'étiquetage, par exemple auprès du groupe de travail 13 de la Commission économique pour l'Europe des Nations unies (CEE-ONU) (<https://unece.org/wp29-introduction>).

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

Des fiches techniques de secours doivent être disponibles pour tous les véhicules à pile à combustible et doivent se trouver à bord du véhicule. Dans l'idéal, les sapeurs-pompiers auront accès à ces informations par le biais de liaisons de communication. Toutefois, il convient de noter que les niveaux d'accès varient considérablement et que cela n'est pas toujours possible. Les paramètres d'identification du véhicule doivent également contenir toutes les caractéristiques de haute tension et de haute pression, afin d'informer le personnel de secours bien à l'avance. Comme pour les véhicules à carburant classique, les composants suivants peuvent présenter des risques pour le personnel de secours en cas d'accident de la route : pare-chocs, amortisseurs, pneus, entretoises de capot et de coffre, airbags, prétensionneurs de ceintures de sécurité, système de climatisation ou encore batteries. Veuillez noter que la déconnexion d'un câble basse tension isolera et éteindra tous les systèmes (par exemple le système de stockage de l'hydrogène, les systèmes haute tension et basse tension) du véhicule à pile à combustible.

4.4 Chariots élévateurs à pile à combustible

De nombreuses entreprises possédant de grands entrepôts ou centres de distribution utilisent actuellement des chariots élévateurs à pile à combustible pour déplacer les marchandises, qui fonctionnent 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7 [1]. Les chariots élévateurs sont des véhicules hybrides qui associent une pile à combustible, généralement de 1,5 à 10 kW, à une batterie. Les cylindres d'hydrogène sont stockés à l'extérieur de l'installation ou de l'entrepôt. L'hydrogène peut être livré sur le site par un fournisseur de gaz industriel ou produit sur place par reformage de gaz naturel ou par électrolyse de l'eau. Le ravitaillement en hydrogène d'un chariot élévateur à pile à combustible a généralement lieu à l'intérieur (mais il existe également des distributeurs extérieurs) et ne prend que quelques minutes. Par rapport aux véhicules spécialisés alimentés par batterie, les chariots élévateurs à pile à combustible présentent 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. Autre avantage : les chariots élévateurs à pile à combustible permettent de réduire les coûts d'exploitation et d'augmenter la productivité grâce à la diminution du nombre de trajets vers la zone de chargement des batteries. 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 peut être utilisé à d'autres fins. Les principaux fournisseurs industriels vendent des stations-service d'hydrogène destinées aux chariots élévateurs à pile à combustible. La [Figure 16](#) présente un exemple de chariot élévateur à pile à combustible et d'unité de piles à combustible.

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours



Chariot élévateur à pile à combustible Pile à combustible d'un chariot élévateur

Figure 16. Chariot élévateur à pile à combustible et son unité de piles à combustible [1]

Les principaux composants d'une unité de piles à combustible sont illustrés sur la Figure 17. Il s'agit notamment des éléments suivants :

- une pile à combustible ;
- les auxiliaires de la pile à combustible ;
- un réservoir de stockage d'hydrogène, dont le volume varie entre 20 et 70 L et qui est 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 la section 38.3 du Manuel d'épreuves et de critères des Nations Unies ;
- le réservoir de collecte d'eau.

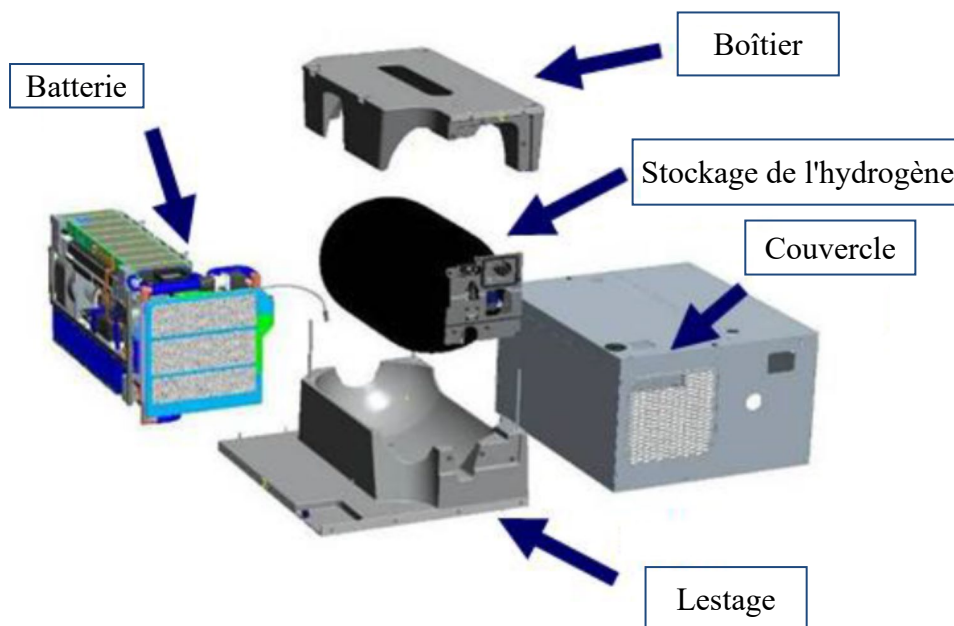


Figure 17. Composants de l'unité de piles à combustible pour chariots élévateurs

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

Du point de vue de la sécurité, le stockage d'hydrogène est protégé par un dispositif de décompression thermique (activé par un fusible thermique) situé entre la vanne d'isolement du chariot élévateur et le cylindre. Le fusible s'ouvre à 109 °C et permet de libérer rapidement l'hydrogène sous pression. L'orifice de remplissage est également équipé d'un clapet anti-retour qui empêche le gaz présent dans le réservoir de s'échapper. 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 en tant que combustible dans les avions a commencé en 1956. Les États-Unis ont fait voler un avion Canberra B57 dont l'un des moteurs utilisait de l'hydrogène sous pression ainsi que de l'hélium [13]. Suite à cela, les Soviétiques ont transformé un avion de ligne Tu-154 pour y intégrer un moteur fonctionnant à l'hydrogène en 1988. Le moteur fonctionnant à l'hydrogène liquide a été testé jusqu'à 7 000 m de haut et a accéléré jusqu'à 900 km/h. Malheureusement, seulement cinq vols ont été réalisés dans le cadre du programme dédié à l'hydrogène liquide (LH), à la suite de quoi ce combustible n'a plus été utilisé en raison des coûts élevés et du manque d'infrastructures liés à l'hydrogène [14]. Jusqu'à présent, 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]. La Figure 18 illustre l'évolution historique des aéronefs fonctionnant à l'hydrogène liquide et aux piles à combustible. En septembre 2016, le premier avion de passagers à quatre places alimenté par une pile à combustible à hydrogène au monde, le HY4, a effectué son premier vol depuis l'aéroport de Stuttgart. Dans ce taxi électrique du futur, l'hydrogène est stocké à une pression comprise entre 296 bar et 400 bar (4 300 psi et 5 800 psi) dans deux réservoirs en fibre de carbone 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 issu 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. Chacun de ces concepts représente une approche différente et explore diverses technologies et configurations aérodynamiques pour parvenir à un vol sans émission, dans l'optique de soutenir l'ambition de l'entreprise d'ouvrir la voie à la décarbonisation de l'ensemble de l'industrie aéronautique. Tous ces concepts reposent sur l'hydrogène en tant que source d'énergie principale. Selon Airbus, cette option de carburant d'aviation propre s'avère particulièrement prometteuse et pourrait permettre à l'aérospatiale ainsi qu'à de nombreuses autres industries d'atteindre leurs objectifs de neutralité climatique.

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

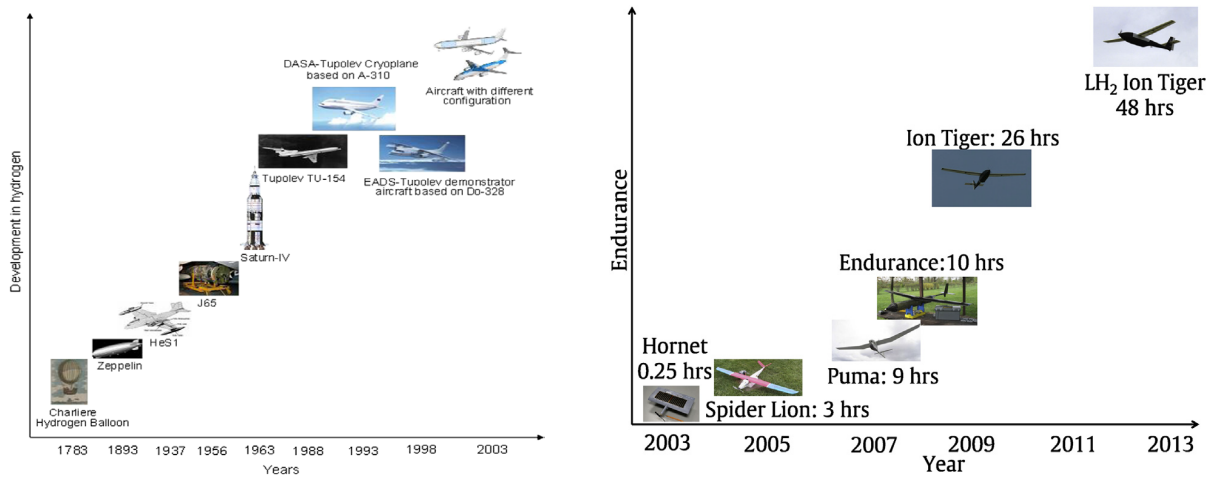


Figure 18 Chronologie du développement des avions fonctionnant à l'hydrogène (à gauche) et à pile à combustible (à droite)

Un avion peut peser jusqu'à 640 tonnes au décollage. Pour transporter une telle charge, il faut des moteurs puissants et de grande taille ; ces derniers consomment beaucoup de carburant. Ces besoins en carburant présentent des avantages et des défis liés à la sécurité du carburant, au coût du carburant, à l'énergie spécifique et à l'efficacité énergétique équivalente. De nos jours, les aéronefs utilisent principalement des carburants dérivés du pétrole, obtenus à partir de combustibles fossiles. Parmi ces carburants, le kérosène est le plus couramment utilisé et également celui qui présente le plus faible coût [15, 17]. Bien que le kérosène et certains mélanges d'essence constituent les options privilégiées pour l'aviation, leurs réserves sont limitées et l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre a un impact négatif sur l'environnement. Compte tenu de ces considérations, les chercheurs et les fabricants envisagent de nouvelles méthodes et formes de traitement de l'énergie au moyen de carburants alternatifs/renouvelables.

Ainsi, les combustibles fossiles classiques utilisés dans l'aviation sont remplacés par des combustibles alternatifs. L'hydrogène représente l'un des combustibles les plus importants. Ces dernières années, l'hydrogène a retenu l'attention des chercheurs et des experts en combustion du fait de sa disponibilité, de ses très bonnes propriétés énergétiques spécifiques et de ses avantages environnementaux.

Dans l'aviation, l'hydrogène est généralement utilisé de deux manières : soit en tant que combustible à la place du kérosène dans les gros avions, soit en tant que combustible dans les piles à combustible à membrane échangeuse de protons des réacteurs des petits avions à hélice [15].

4.5.1 L'hydrogène en tant que carburant de propulsion

L'hydrogène présente toutes les propriétés requises pour être utilisé en tant que carburant ainsi que la densité énergétique par unité de masse la plus élevée de tous les combustibles connus (2,8 fois plus élevée que pour le kérosène) [17, 18]. Cette propriété est très importante car elle

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

permet une plus grande charge utile [19]. L'hydrogène présente un autre avantage : en protégeant l'environnement, il assure le développement à long terme de l'aviation [18].

L'utilisation de l'hydrogène en tant que carburant d'aviation permettrait d'éliminer la plupart des émissions de gaz à effet de serre (GES), notamment toutes les émissions à base de carbone, la suie et les oxydes de soufre [20]. Au cours d'un processus de combustion, les principaux sous-produits de l'hydrogène sont la vapeur d'eau et les oxydes d'azote (NO_x) [21]. Toutefois, les émissions de NO_x libérées par la combustion de l'hydrogène sont extrêmement faibles par rapport à celles libérées par la combustion du kérosène [22]. En outre, l'adoption de l'hydrogène en tant que carburéacteur pourrait assurer la stabilité à long terme des prix du carburant et renforcer la fiabilité de l'approvisionnement en carburant. En effet, il peut être obtenu à partir de différents types de sources, réduisant ainsi la dépendance à l'égard des combustibles fossiles concentrés dans seulement quelques régions du monde [23, 24]. Capable de fournir une énergie propre, fiable et abordable, émettant des émissions polluantes extrêmement faibles et ayant donc un faible impact sur l'environnement, l'hydrogène est ainsi jugé propice à l'industrie aéronautique [21].

Pour que l'hydrogène soit viable pour l'industrie aéronautique, sa densité volumétrique ou énergétique par unité de volume doit augmenter [25, 26]. Par rapport au kérosène, un volume de LH_2 quatre fois plus important est nécessaire pour fournir la même quantité d'énergie [27]. Toutefois, en dépit de cet inconvénient, des rapports montrent que les avions fonctionnant à l'hydrogène sont plus efficaces en termes de poids et impliquent des coûts d'exploitation inférieurs à ceux des avions fonctionnant au kérosène [27]. En général, il convient de modifier la conception des avions et des moteurs lorsque de l'hydrogène est utilisé en tant que carburéacteur. Le LH_2 utilisé dans les avions fonctionnant à l'hydrogène doit être maintenu à des températures très basses. Pour ce faire, il ne peut être stocké que dans des réservoirs dotés d'une bonne isolation et non dans les ailes, ces dernières disposant d'un espace restreint pour accueillir le LH_2 et ne pouvant pas être isolées correctement. Les réservoirs d'hydrogène étant très volumineux, il convient de modifier la conception des avions en augmentant le volume et le poids du fuselage, qui constitue le meilleur endroit pour placer les réservoirs de LH_2 . Pour les avions de type court ou moyen courrier, les réservoirs d'hydrogène peuvent être placés au-dessus de la cabine des passagers. En revanche, pour les avions de type long courrier, l'hydrogène est stocké dans deux grands réservoirs intégrés ; l'un d'eux est situé directement derrière le cockpit et l'autre est placé à l'arrière de la cabine des passagers [28]. La configuration des réservoirs d'hydrogène a un impact considérable sur l'efficacité énergétique des avions fonctionnant à l'hydrogène [28]. Du fait de son poids plus élevé, le réservoir supérieur utilisé dans les avions de type court ou moyen courrier peut augmenter la consommation énergétique de 6 à 19 %. En revanche, la conception intégrée propre aux avions de type long courrier est susceptible d'augmenter l'efficacité énergétique de 12 % [28]. On peut donc en conclure que l'hydrogène convient mieux aux avions de type long courrier. Le fuselage des avions fonctionnant à l'hydrogène étant utilisé pour stocker les réservoirs d'hydrogène, un fuselage

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

plus grand et plus lourd est nécessaire pour supporter les charges générées par ces réservoirs. La masse du fuselage des avions fonctionnant à l'hydrogène est supérieure de près de 6 % à celle des avions standard [24]. Outre la modification de la conception de l'avion, le moteur doit également être modifié en raison de la variation des gaz de combustion dans le cadre de la conversion en hydrogène et des propriétés différentes du kérosène et de l'hydrogène. Pour l'hydrogène, il est possible d'utiliser des moteurs plus petits [24]. Les modifications apportées à la conception des avions et des moteurs entraînent une augmentation des coûts de production et d'entretien qui peut atteindre 25 % [23].

4.5.2 Les piles à combustible à hydrogène dans les applications aéronautiques

Une pile à combustible à hydrogène est un dispositif électrochimique qui produit de l'électricité par le biais d'une réaction électrochimique entre l'hydrogène et l'oxygène. Les piles à combustible sont silencieuses, produisent peu de vibrations et n'émettent pas d'émissions de NO_x , ce qui les rend très intéressantes dans une large gamme d'applications. Parmi les différents types de piles à combustible, les piles à combustible à membrane échangeuse de protons et les piles à combustible à oxyde solide ont tout particulièrement été envisagées pour les applications aéronautiques. Les piles à combustible à hydrogène pourraient être utilisées à bord des avions pour alimenter différents systèmes et éléments qui sont actuellement alimentés par des batteries, par exemple le système de portes de secours, l'éclairage des voies d'évacuation au sol, la radiobalise de détresse, l'enregistreur de données de vol et l'enregistreur phonique du cockpit.

Le groupe auxiliaire de puissance d'un avion est une petite turbine à gaz qui fait office de source d'électricité et d'air comprimé pour le fonctionnement d'autres composants de l'avion, par exemple les réacteurs et les systèmes environnementaux, lorsque les moteurs principaux ne tournent pas. Des systèmes de piles à combustible pourraient être utilisés à la place des groupes auxiliaires de puissance classiques ou combinés avec ces derniers afin de former un système de puissance hybride [29]. Les piles à combustible à membrane échangeuse de protons et à oxyde solide peuvent toutes deux être utilisées dans les groupes auxiliaires de puissance [30]. Cependant, les piles à combustible à oxyde solide sont plus favorables aux applications aéronautiques, en particulier pour l'alimentation des groupes auxiliaires de puissance [29]. Les piles à combustible à oxyde solide tolèrent mieux les impuretés du carburant et peuvent fonctionner avec de l'hydrogène issu du reformage du kérosène [29]. En outre, la température de fonctionnement élevée des piles à combustible à oxyde solide permet au processus de reformage interne du kérosène d'avoir lieu et renforce son efficacité. Cependant, un groupe auxiliaire de puissance alimenté par une pile à combustible à oxyde solide est plus lourd qu'un groupe auxiliaire de puissance alimenté par une pile à combustible à membrane échangeuse de protons ou qu'un groupe classique. En effet, il requiert des éléments auxiliaires plus grands, tels que l'installation de reformage, le compresseur, les pompes, les échangeurs thermiques, etc. Une pile à combustible à membrane échangeuse de protons ne peut être utilisée pour

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

alimenter le groupe auxiliaire de puissance que si la source d'hydrogène est installée dans l'avion.

L'amélioration de la qualité de l'air autour des aéroports suscitant de plus en plus d'intérêt, les piles à combustible font l'objet d'une attention accrue. En effet, elles pourraient alimenter différents équipements de soutien au sol et d'autres véhicules terrestres présents dans les aéroports, tels que les navettes de passagers et les camions de ravitaillement, dans un futur proche [30]. Les équipements de soutien au sol et les dispositifs de manutention des aéronefs sont utilisés pour gérer les passagers, le fret, les installations et les aéronefs entre deux vols, lorsqu'ils se trouvent dans l'aéroport. Les équipements de soutien au sol incluent différents systèmes présentant différentes exigences en matière d'alimentation. Aujourd'hui, bon nombre d'équipements de soutien au sol utilisés dans les aéroports sont alimentés par des piles à combustible à hydrogène. Le Ministère américain de l'énergie a annoncé qu'environ 250 millions de dollars américains allaient être dédiés au déploiement de piles à combustible pour les véhicules de transport de bagages au sein des aéroports [31]. Des chariots élévateurs de taille moyenne alimentés par des piles à combustible ont déjà été testés dans de grands aéroports comme ceux de Toronto Pearson, Hambourg et Munich [32]. Ces chariots élévateurs présentent de nombreux avantages tels que le faible niveau sonore, l'absence d'émissions et les faibles besoins d'entretien. Ils ont pratiquement les mêmes dimensions que les chariots classiques alimentés par des batteries, mais il n'est plus nécessaire de changer de batterie (ce qui s'avère très difficile sur la plupart des chariots classiques). En outre, les chariots élévateurs à pile à combustible présentent un autre avantage majeur par rapport aux chariots élévateurs à batterie : le temps de ravitaillement. En effet, le ravitaillement peut être effectué en quelques minutes alors que la recharge de la batterie prend plusieurs heures [33]. Les piles à combustible peuvent également être utilisées pendant plus de huit heures sans qu'il ne soit nécessaire de procéder au ravitaillement. On peut donc conclure que le remplacement des batteries classiques des chariots élévateurs par des piles à combustible est économiquement viable vis-à-vis du coût d'investissement initial aussi bien que des coûts d'exploitation. Un aéroport danois utilise actuellement des chariots à bagages fonctionnant avec des piles à combustible. En 2015, FedEx a mis en service les premiers tracteurs de marchandises alimentés par des piles à combustible, capables de tracter environ 15 tonnes de marchandises [34]. Outre les applications liées aux équipements de soutien au sol, les piles à combustible peuvent être utilisées pour alimenter les véhicules de l'aéroport tels que les bus de passagers. À Tokyo, certains des bus assurant la liaison entre le centre de Tokyo et l'aéroport de Tokyo sont équipés d'un système hybride à pile à combustible à hydrogène/batterie [35]. L'aéroport international d'Hawaï a prévu d'utiliser un bus hybride à pile à combustible/batterie pour transporter les usagers entre les terminaux de l'aéroport et un centre de location de voitures [36].

Les piles à combustible sont également considérées comme une nouvelle source d'énergie qui pourrait remplacer les batteries existantes des aéronefs sans pilote. Le facteur le plus attractif des aéronefs sans pilote alimentés par batterie est le coût, puisqu'il est presque deux fois moins

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

élevé que celui des aéronefs alimentés par une pile à combustible. Cependant, l'augmentation du poids de la batterie nécessaire pour assurer une longue durée de vol restreint les performances des aéronefs sans pilote alimentés par batterie [37]. Dans le contexte de l'alimentation des aéronefs sans pilote, les piles à combustible présentent les avantages suivants : prolongation de la durée et de la distance des missions grâce à une densité énergétique supérieure, fonctionnement silencieux et fiable et réduction des obstacles liés au chargement et au transport des batteries au lithium [38]. Grâce à leur faible température de fonctionnement, les piles à combustible à membrane échangeuse de protons sont privilégiées pour les applications liées aux aéronefs. Cela se traduit par l'utilisation d'éléments auxiliaires de plus petite taille. En 2005, AeroVironment a mis au point le premier aéronef sans pilote à pile à combustible [39]. D'une envergure de 15 m, l'aéronef a été propulsé par un système de propulsion à pile à combustible à membrane échangeuse de protons et a réussi à voler pendant plus d'une heure en utilisant uniquement de l'hydrogène liquéfié. En 2006, Bradley et al. [40] ont conçu et testé un aéronef sans pilote alimenté par une pile à combustible utilisant de l'hydrogène comprimé. Les chercheurs à l'origine de cet essai ont démontré qu'un aéronef présentant une envergure de 6,58 m et une masse totale de 16,4 kg pouvait être alimenté par une pile à combustible à membrane échangeuse de protons de 500 W. Actuellement, d'importants travaux de recherche sont menés à l'échelle internationale pour concevoir, élaborer et construire des aéronefs sans pilote alimentés par des piles à combustible. Ces travaux aboutissent à une augmentation considérable de l'endurance, qui a récemment dépassé 48 heures [41]. Grâce à la réduction du poids des piles à combustible, l'amélioration de leur fiabilité et de leur durabilité, l'accélération du temps de démarrage et l'augmentation de leur densité de puissance, la technologie des piles à combustible va devenir de plus en plus intéressante pour les aéronefs sans pilote [42].

5. Transport d'hydrogène

Comme vous l'avez appris, l'industrie utilise l'hydrogène depuis de nombreuses décennies. Après avoir été produit sur un site de production centralisé, l'hydrogène est généralement transporté vers les utilisateurs finaux ou vers les applications de piles à combustible concernées. L'hydrogène peut être transporté sous forme de gaz comprimé ou de liquide cryogénique. Son transport en vrac peut donc être assuré par différentes voies : par la route, dans des camions/remorques et des réservoirs, ou par le biais de tuyaux.

5.1 Poids lourds (PL)

5.1.1 Camions à gaz

Les entreprises de gaz industriels utilisent actuellement des flottes de camions pour transporter les 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 cylindres simples, des faisceaux de cylindres ou de longs tubes cylindriques sont installés sur des remorques (Figure 19). La pression de stockage varie de 200 à 300 bar et une remorque peut transporter de 2 000 à

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

6 200 Nm³ de CGH₂ pour les camions, sous réserve d'une limite de poids de 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 cylindres 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 composites légers et bobinés (type II). Ce mode de livraison est relativement simple, mais il doit être adapté aux quantités d'hydrogène ainsi qu'aux distances pour être compétitif en termes de coûts. Les principales restrictions liées à la livraison par camion de gaz comprimé sont les coûts d'investissement, l'exploitation et l'entretien, y compris la main-d'œuvre des chauffeurs, et les coûts du carburant.



Source : AirLiquide, 2014.

Figure 19. Deux types de remorques de CGH₂ exploitées par AirLiquide en Europe : (a) remorque à tubes transportant 2 000 à 3 000 Nm³ d'hydrogène et (b) remorque à cylindres composites transportant 6 200 Nm³ d'hydrogène.

Le transport par camion à gaz (remorque à tubes, cylindres) est l'un des modes les plus aboutis pour le transport de petites quantités d'hydrogène sur de courtes distances. Il présente deux principales limites : la faible capacité de stockage, pour les clients consommant beaucoup d'hydrogène et devant s'en faire livrer fréquemment, et la faible pression de l'hydrogène fourni, qui doit faire l'objet d'une compression supplémentaire dans une station-service. C'est pourquoi des technologies alternatives offrant une pression plus élevée, une plus grande capacité de transport de l'hydrogène et des systèmes moins coûteux sont étudiées, comme indiqué ci-après. Lincoln Composites développe des tubes composites de plus grande capacité. Le matériau utilisé pour fabriquer le réservoir est un liner en plastique entièrement bobiné en fibres de carbone imprégnées d'époxy, qui convient au transport d'hydrogène gazeux sur des remorques à tubes. Par exemple, le réservoir TITANTM (1,08 mètre de diamètre, 11,5 mètres de long, 8 400 litres de volume et 2 087 kg) fonctionne à une pression de 250 bar. Il permet de stocker/transporter 2 à 3 fois plus d'hydrogène que les réservoirs en acier de masse similaire. La [Figure 20](#) représente une unité de stockage contenant quatre réservoirs composites capables de stocker 600 kg d'hydrogène à une pression de 250 bar. Des réservoirs adaptés à des pressions plus élevées sont en cours d'élaboration.



Source : Lincoln Composites, 2014.

Figure 20. Remorque transportant quatre réservoirs composites élaborés par Lincoln Composites.

Le Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) étudie des technologies hybrides telles que la cryocompression, qui associe 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 celui que l'on trouve dans les réservoirs de gaz comprimés ordinaires à température ambiante. Ces nouveaux réservoirs permettraient de stocker de l'hydrogène à des températures de seulement 80 K et à des pressions de 200 à 400 bar. Cette approche requiert d'élaborer des réservoirs composites sous pression isolés. 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 entre 80 et 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 bar), ce qui devrait permettre de réduire de 50 % le coût des remorques.

Les principaux dispositifs de sécurité utilisés dans les camions à gaz sont les vannes 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 place et déploie la béquille ;
- Le conducteur dételle le tracteur ;
- Le conducteur raccorde le tuyau de la semi-remorque pleine, teste l'étanchéité du tuyau de vidange et déconnecte la semi-remorque vide ;
- Le conducteur attelle la semi-remorque vide au tracteur et part.

- Test manuel d'étanchéité lors du raccordement à une semi-remorque. Il se déroule selon les étapes suivantes. L'opérateur raccorde le tuyau de la semi-remorque à la borne de raccordement

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours de l'installation. Le tuyau est mis sous pression. L'opérateur vérifie l'étanchéité à l'aide d'un savon de détection et la 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 (refroidi à moins de 20 K ou -253 °C) afin de distribuer de plus grandes quantités (des centaines de m³/h). En termes de capacité de poids, les camions d'hydrogène liquide super-isolés (LH₂) peuvent transporter jusqu'à 10 fois plus d'hydrogène que les remorques à tubes utilisées pour le transport du CGH₂. Les camions de LH₂ fonctionnant à la pression atmosphérique présentent une capacité volumétrique d'environ 50 000 à 60 000 litres et peuvent transporter jusqu'à 4 000 kg (Figure 21). Il s'agit d'un mode de distribution privilégié pour les moyennes/grandes quantités d'hydrogène sur de longues distances, ce qui explique que l'activité liée au LH₂ se soit surtout développée en Amérique du Nord (la capacité de liquéfaction de l'hydrogène en Amérique du 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 : Banque d'images AirLiquide, 2015

Figure 21. 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 à forte intensité de capital. Le processus de liquéfaction est également 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) [58]. 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 d'un camion de liquide étant beaucoup plus élevée que celle d'un camion de gaz comprimé, ce mode de livraison est moins tributaire 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 de liquide par camion est plus économique que le transport de gaz par camion 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.

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

Actuellement, le marché de l'hydrogène industriel est desservi par quatre liquéfacteurs 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 permettraient 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, l'amélioration de la conversion ortho-para, le développement de la réfrigération magnétique, etc.).

5.2 Trains

Le premier train à hydrogène du Royaume-Uni, élaboré dans le cadre du projet HydroFLEX, a entamé son premier voyage sur les voies ferrées du Warwickshire en septembre 2020. Dans les années à venir, d'autres trains à pile à combustible seront mis sur les rails dans toute l'Allemagne. Toutefois, la question reste de savoir quelle est la meilleure façon d'approvisionner en hydrogène les stations-service d'hydrogène des trains. Les voies ferroviaires représentent une possibilité approuvée 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 (reportez-vous à la [Figure 22](#)).



Source : NPROXX, 2020

Figure 22. Transport d'hydrogène par voie ferroviaire.

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

Les experts de DB Energie ont conclu qu'il était possible d'approvisionner l'infrastructure de ravitaillement en hydrogène par voie ferroviaire. Par rapport à la route, les avantages sont nombreux : planification précise des temps de transport, haut niveau de fiabilité et de sécurité, possibilité de transporter de grandes quantités et allègement du trafic routier dans les zones métropolitaines. D'un point de vue technique et juridique, rien ne s'oppose au transport par voie ferroviaire. 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 sera probablement possible d'obtenir une certification liée à l'utilisation ferroviaire prochainement. Pour connaître la faisabilité et l'efficacité économique, il convient d'analyser une étude distincte afin de déterminer si le transport par voie ferroviaire est plus économique que le transport par route. Sur les deux itinéraires examinés, le trafic ferroviaire s'est avéré légèrement moins performant. Cela dit, il n'a pas été possible d'en tirer des conclusions générales. 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 pile à combustible à l'avenir.

5.3 Pipelines

De nos jours, un certain nombre de pipelines d'hydrogène commerciaux sont utilisés pour distribuer de grandes quantités (des dizaines de milliers de m³/h) d'hydrogène gazeux sur le marché industriel. Leur longueur varie de moins d'un kilomètre à plusieurs centaines de kilomètres. 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 principalement de la part des raffineries, les réseaux existants s'étendent et de nouvelles portions sont construites. Par exemple, en mars 2009, Air Products a annoncé l'extension de 60 km du réseau de pipelines d'hydrogène 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. Dans les secteurs du raffinage et de la chimie, la plupart des pipelines se trouvent à des endroits associés à la consommation d'importantes quantités d'hydrogène. Il s'agit notamment de systèmes situés dans le nord de l'Europe (Pays-Bas, nord de la France et 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). De plus petits systèmes 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 23](#) présente des parties du réseau mondial de pipelines d'hydrogène. Par exemple, le pipeline de 240 km de long dans la région allemande de la Ruhr ([Figure 23 a](#)), acquis par Air Liquide en 1998, est en service depuis 1938. Dans le cadre du projet européen « Zero Region » portant sur les applications énergétiques de l'hydrogène, Linde a installé un pipeline d'hydrogène de 900 bar (2,5 cm [1 po] 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 destinée au personnel de secours

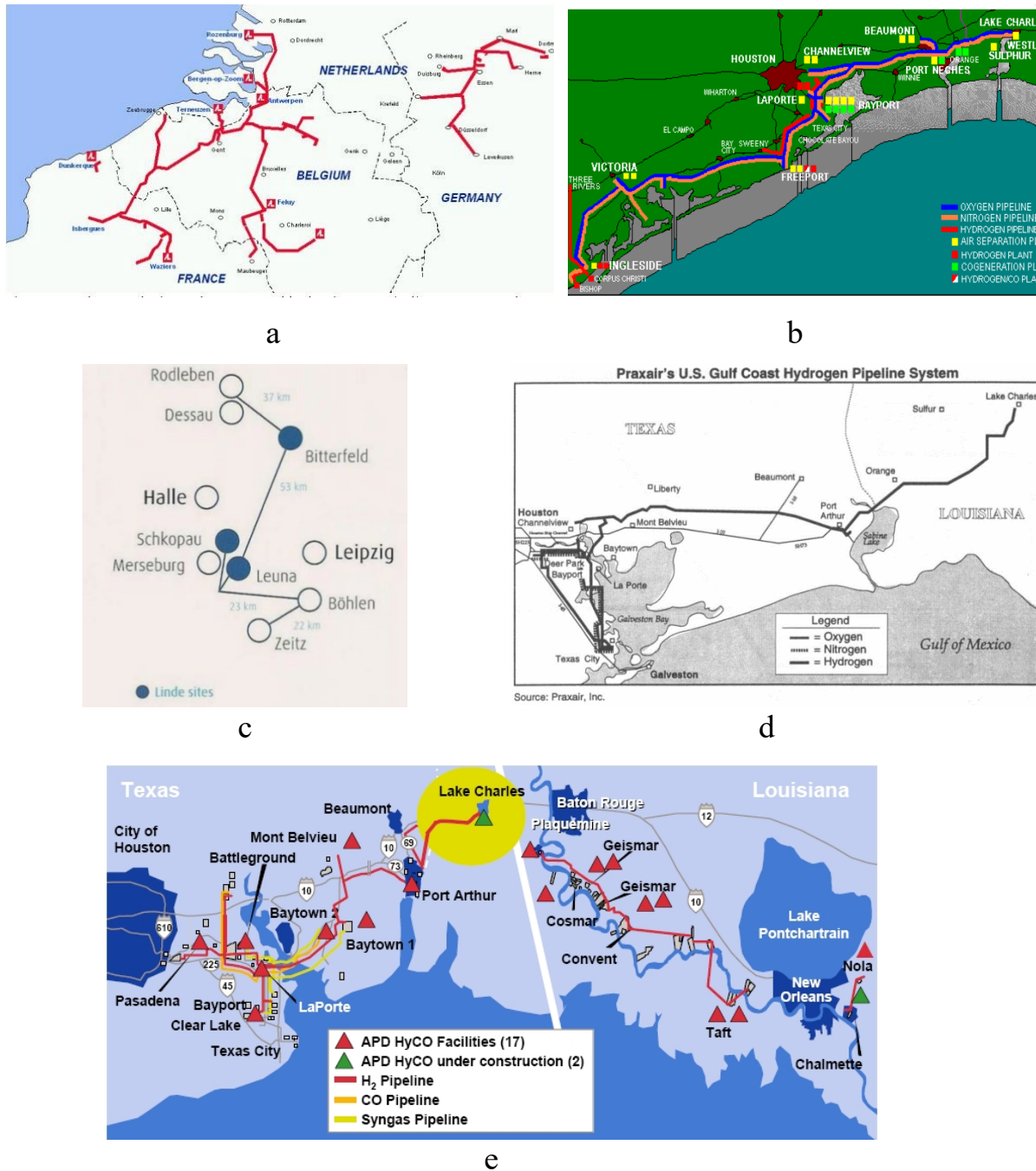


Figure 23. Principaux pipelines d'hydrogène dans le monde : (a) pipelines d'hydrogène Air Liquide au Benelux, en France et en Allemagne (région de la Ruhr) ; (b) pipelines d'hydrogène Air Liquide dans le Golfe du Mexique (États-Unis) ; (c) pipelines d'hydrogène Linde en Allemagne ; (d) pipelines d'hydrogène Praxair dans le Golfe du Mexique (États-Unis) ; (e) pipelines d'hydrogène Air Product dans le Golfe du Mexique (États-Unis).

Les pipelines sont associés à une conception, une installation ainsi qu'à des procédures d'entretien spécifiques. La pression de fonctionnement des pipelines d'hydrogène est généralement inférieure à 100 bar (le plus souvent, elle est comprise entre 40 et 70 bar). Leur diamètre (D) est généralement compris entre 10 et 300 mm. Les pipelines actuels sont fabriqués en acier. Toutefois, un problème technique se pose : la fragilisation par l'hydrogène des

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

pipelines métalliques et des soudures, qui se caractérise par une perte de ductilité puis par une rupture lorsqu'ils sont soumis à des contraintes. Les aciers utilisés pour fabriquer les pipelines d'hydrogène sont des aciers à faible teneur en carbone, faiblement alliés et à faible résistance afin de réduire le risque de fragilisation (par exemple, l'acier API X42 présentant une teneur en carbone $C < 0,2 \%$ en poids et une teneur en manganèse $Mn < 1,3 \%$ en poids). Ces aciers associent un coût abordable à un ensemble approprié de propriétés physiques telles que la résistance, la ténacité, la ductilité et la soudabilité. Pour des raisons de sécurité, la plupart des pipelines sont enterrés et les aciers sont protégés par des revêtements ou par une protection cathodique afin d'éviter la corrosion.

L'assemblage d'un pipeline implique de nombreuses soudures. Pour des raisons de sécurité, un certain nombre d'inspections doivent être effectuées avant la mise en service. L'exploitation d'un réseau de pipelines nécessite également des stations de compression, car l'hydrogène est généralement disponible à basse pression. Les compresseurs d'hydrogène qui alimentent le réseau de pipelines se trouvent généralement sur les sites de production de l'hydrogène. Ces compresseurs sont coûteux et requièrent beaucoup d'entretien ; c'est pourquoi ils ne sont installés que lorsqu'aucune autre solution n'est disponible. Par exemple, lorsque l'hydrogène est produit à partir de gaz naturel (reformage du méthane à la vapeur), le gaz naturel d'alimentation peut être comprimé et l'installation de production exploitée à une pression plus élevée. Les pertes par frottement sont beaucoup plus faibles au niveau des pipelines transportant de l'hydrogène qu'au niveau des pipelines transportant du gaz naturel, car la viscosité de l'hydrogène est plus faible (pendant le transport de l'hydrogène, la perte d'énergie représente environ 4 % de la densité énergétique).

Du fait de la plus faible densité volumétrique de l'hydrogène, un pipeline d'hydrogène transporte environ 30 % d'énergie en moins qu'un pipeline de gaz naturel. Pour distribuer des quantités d'énergie plus importantes dans les pipelines d'hydrogène, il convient d'augmenter la pression de débit (> 100 bar). Cette augmentation de la pression peut influencer sur le matériau susceptible d'être utilisé pour fabriquer le pipeline. En outre, les conditions d'exploitation d'un pipeline d'hydrogène destiné à des applications énergétiques diffèrent de celles d'un pipeline industriel qui fonctionne aujourd'hui à des pressions presque constantes, sans cycles de pression importants. Les pipelines d'hydrogène destinés à des applications énergétiques doivent faire face à des variations de pression. Cela peut poser problème en raison de la sensibilité des aciers à la fragilisation par l'hydrogène, qui affecte leurs propriétés mécaniques et diminue leur résistance à la fissuration par fatigue. Les phénomènes de fragilisation par l'hydrogène seront abordés dans le cours intitulé « Sécurité du stockage de l'hydrogène ». Les recherches se penchent à nouveau sur l'élaboration de nouveaux matériaux de pipelines compatibles avec l'hydrogène et sur leur aptitude à fonctionner à des pressions plus élevées, ainsi que sur la réduction des coûts d'investissement. De nouveaux aciers sont étudiés afin de mieux comprendre la fragilisation par l'hydrogène et d'identifier les compositions d'acier ainsi que les

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours
procédés adaptés à la construction d'une nouvelle infrastructure de pipelines ou à l'utilisation potentielle de l'infrastructure de pipelines en acier existante.

Les recherches actuelles se concentrent également sur les alternatives aux pipelines métalliques afin d'atteindre les objectifs de coût et de performance liés au transport et à la distribution de l'hydrogène. Les pipelines en polymère et en polymère renforcé de fibres font l'objet d'études. En effet, ils présentent l'avantage d'être plus légers, plus faciles à manipuler, à assembler et à souder et moins sensibles à la corrosion et à la fragilisation par l'hydrogène que les pipelines en acier. Les conduites en polymère actuellement utilisées dans le réseau de distribution de gaz naturel sont fabriquées en polyéthylène et présentent une pression nominale limitée à 10 bar. Les polymères tels que le polyamide présentent davantage d'intérêt car la perméabilité de l'hydrogène est considérablement réduite et ses propriétés thermomécaniques permettent aux tuyaux de supporter une pression de fonctionnement de 20 bar ainsi qu'une température de fonctionnement de 80 °C.

Ainsi, les tuyaux en plastique peuvent constituer une alternative viable à l'acier grâce aux économies réalisées sur les coûts d'installation et d'entretien. Cependant, les coûts de ces nouveaux polymères peuvent s'avérer très élevés. Les tuyaux fabriqués en matériaux composites (polymère ou plastique renforcé de fibres) comportent un liner thermoplastique (principalement en polyéthylène). Ce dernier est enveloppé de fibres à haute résistance (il s'agit généralement de fibres d'aramide) revêtues d'une couche thermoplastique. Cette dernière couche protège des agressions environnementales et contribue à conserver l'enveloppe responsable des propriétés mécaniques. Par rapport aux tuyaux en plastique simples, le bobinage en fibres d'aramide permet de faire monter la pression jusqu'à 100 bar. Au Moyen-Orient, ces tuyaux en plastique renforcé sont d'ores et déjà utilisés dans le cadre de la distribution de gaz naturel ou de pétrole brut. Leur développement en vue de l'alimentation en hydrogène fait actuellement partie du programme dédié à l'hydrogène du Ministère américain de l'énergie (Figure 24). Lorsqu'ils sont installés sur de grandes longueurs (200 à 300 mètres), les tuyaux en plastique renforcé de fibres pourraient constituer une alternative rentable aux tuyaux métalliques. Toutefois, le processus de fabrication ne permet pas de produire des tuyaux en plastique présentant un diamètre aussi élevé que les tuyaux en acier (100 contre 150 mm). Quelques perfectionnements s'imposent encore pour évaluer la faisabilité des opérations de fabrication à grande échelle, évaluer la technologie d'assemblage et élaborer différents codes et normes relatifs aux pipelines d'hydrogène en plastique renforcé de fibres.



Figure 24. Pipelines composites en plastique renforcé de fibres.

6. Applications stationnaires

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

Dans les centrales de production combinée de chaleur et d'électricité classiques, l'électricité et la chaleur sont produites par la combustion de gaz naturel dans un moteur à combustion interne ou une turbine. Les systèmes de production combinée de chaleur et d'électricité fondés sur les piles à combustible produisent de l'électricité et de l'eau chaude par l'intermédiaire de la réaction électrochimique décrite précédemment. Deux technologies de piles à combustible sont envisagées : les piles à combustible à oxyde solide et les piles à combustible à membrane échangeuse de protons. Le gaz naturel est converti pour produire de l'hydrogène. Un mélange d'hydrogène, de dioxyde de carbone et de monoxyde de carbone (appelé gaz de synthèse) contenant des impuretés est envoyé directement à la pile à combustible pour produire de l'énergie. Dans les systèmes de piles à combustible à membrane échangeuse de protons, qui utilisent des températures plus basses, le gaz de synthèse doit être purifié davantage afin d'éliminer le monoxyde de carbone et les composés contenant du soufre. Dans le cadre du projet Callux (<http://enefield.eu/>), des installations de micro-production combinée de chaleur et d'électricité ont été introduites en Europe.

6.2 Production d'énergie de secours

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

- Une grande fiabilité et un démarrage rapide.
- Une autonomie évolutive, uniquement en fonction du volume de stockage du gaz.
- Un faible entretien.
- Un fonctionnement propre et silencieux [1].

Les utilisateurs potentiels de ce type d'application sont les suivants : les télécommunications, les centres de données, les hôpitaux, l'armée, l'industrie, les hôtels de luxe, etc. Un exemple de

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

Le système est illustré sur la [Figure 25](#), qui représente une unité d'alimentation de secours à pile à combustible utilisée dans le cadre du projet IP Energy (Aix-en-Provence, France). Installé en 2008, ce système d'alimentation de secours de 30 kW constitue la première solution conteneurisée. Le stockage interne de gaz assure une capacité de fonctionnement de 4 heures.



Figure 25. Alimentation de secours à pile à combustible couplée à un centre de données IP Energy.

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

- Le système de pile à combustible comporte deux conduites d'évacuation distinctes ; l'une pour l'oxygène et l'autre pour l'hydrogène. Elles permettent d'évacuer le gaz sur le toit du réservoir, à une certaine distance de sécurité afin de ne pas mélanger l'oxygène et l'hydrogène. Suite à l'évacuation, il reste une quantité résiduelle d'hydrogène dans le système.
- Le compartiment de traitement est équipé de deux capteurs d'hydrogène capables de déclencher un arrêt d'urgence si la concentration en hydrogène dans les réservoirs est supérieure à 0,4 % en volume. En cas de détection d'une concentration anormale en hydrogène, un arrêt de sécurité se déclenche et les mesures suivantes sont prises :
 - Arrêter tous les processus du système.
 - Activer les systèmes de ventilation mécanique.
 - Isoler les réservoirs de stockage de gaz en fermant les électrovannes.
- La concentration en 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 réservoirs sont équipés de détecteurs d'incendie. En cas d'activation de ces derniers, il convient de prendre les mesures suivantes :
 - Arrêter tous les processus du système.
 - Isoler les réservoirs de stockage de gaz en fermant les électrovannes.
 - Couper les systèmes de ventilation.

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

- Il convient d'éviter toute atmosphère explosive dangereuse découlant de fuites ou de libérations potentielles d'hydrogène dans l'enveloppe de la pile à combustible. Les mesures de prévention passive comprennent notamment l'utilisation de joints fixés de manière permanente et construits de façon à limiter le taux de libération maximal à une valeur prévisible, ainsi que la ventilation naturelle. Les méthodes de prévention active comprennent notamment la ventilation active, un système de détection des gaz inflammables ainsi que d'autres moyens de détection des fuites (par exemple, par le biais de mesures de la pression par rapport aux paramètres de contrôle).
- L'intérieur du réservoir, au sein duquel l'hydrogène peut fuir ou se diffuser, n'est pas classé puisque des barrières de sécurité garantissent l'absence d'hydrogène dangereux ATEX au niveau du point de fuite ou par accumulation. Néanmoins, tous les équipements installés juste en dessous du plafond du réservoir et capables d'enflammer des mélanges hydrogène-air inflammables sont certifiés pour une utilisation dans les environnements dangereux ATEX Zone 2. Il s'agit notamment 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. Lorsque l'atmosphère est enrichie en oxygène, le risque d'incendie est accru. En raison du risque d'incendie, il convient d'éviter tout contact entre l'oxygène et les matières organiques.
- Lors de la conception et de l'exploitation de ce système, il convient de prendre des mesures générales de prévention des risques :
 - Choix correct des matériaux (par exemple, acier inoxydable dégraissé), utilisation de tuyaux protégés et sans coudes brusques, raccords étanches, etc.
 - Limitation des débits d'oxygène en fonction de la pression.
 - Protection des conduites d'oxygène par des filtres afin de piéger les poussières susceptibles de s'enflammer.
 - Ventilation naturelle et forcée dans le compartiment de traitement.
 - Réduction de la longueur des tuyaux sous haute pression, distance de sécurité suffisante entre les tuyaux et les composants électriques.
 - Regroupement des unités contenant de l'oxygène dans une zone délimitée (compartiment).
- Respect des procédures de contrôle et d'entretien (essais périodiques) de l'installation [1].

7. Applications marines

Les piles à combustible à hydrogène ont prouvé leur efficacité dans de nombreuses applications, notamment les bus, les camions, les voitures, les chariots élévateurs et même les trains de passagers. Suite à leur intégration réussie dans les véhicules terrestres lourds, les piles à combustible sont désormais intégrées dans les navires. Les piles à combustible jouent un rôle clé en aidant les industries maritimes à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre (GES) sur l'eau et dans les ports.

La navigation maritime est reconnue en tant que source importante d'émissions de gaz à effet de serre. Les émissions élevées de gaz à effet de serre sont dues au carburant classique de faible qualité utilisé dans les moteurs des navires, qui produisent 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 afin de les réduire. En conséquence, des réglementations visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre dans le cadre du trafic maritime sont mises en place dans le monde entier. Par exemple :

- En 2018, le Parlement norvégien a adopté une résolution visant à protéger les fjords du pays, inscrits au patrimoine mondial : cette résolution mettra fin à toutes les émissions des bateaux de croisière et des ferries dans les fjords d'ici 2026 [59].
- Les normes relatives aux émissions visibles de l'État de l'Alaska limitent les émissions visibles des navires dans un rayon d'environ cinq kilomètres (trois miles) des côtes.
- L'Organisation maritime internationale (OMI) a adopté des mesures obligatoires pour réduire les émissions de gaz à effet de serre puis les éliminer complètement d'ici la fin du siècle. Sa stratégie initiale vise à réduire les émissions totales de gaz à effet de serre liées au transport maritime international d'au moins 50 % par rapport aux niveaux de 2008 d'ici 2050.
- L'Agence européenne pour la sécurité maritime (AESM) prévoit de réduire les émissions de dioxyde de carbone liées au transport maritime de l'UE d'au moins 40 % (par rapport aux niveaux de 2005) d'ici 2050. D'autres zones de contrôle des émissions font l'objet de discussions pour l'Arctique, l'Amérique centrale, la Méditerranée et la mer Noire, le Japon, la Corée et l'Australie.

Ces réglementations relatives aux émissions auront une influence importante sur les navires maritimes et les organisations qui les exploitent. Pour s'adapter à ces changements, les opérateurs de flotte ont besoin de solutions permettant de réduire considérablement les émissions. Au vu des nombreux types de navires qui existent, l'industrie maritime a besoin d'une véritable solution « zéro émission » 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

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

et les bateaux de service sur les lacs. Cependant, dans de nombreuses applications, la faible densité de puissance et le poids élevé restreignent l'utilisation des batteries. Pour les navires, les piles à combustible représentent la seule option viable et véritablement « zéro émission ». Tout comme les batteries, les piles à combustible produisent de l'électricité de manière très efficace grâce à un processus électrochimique. La différence réside dans le fait qu'avec une pile à combustible, l'énergie est stockée séparément sous forme d'hydrogène. Tant que le combustible est disponible, les systèmes d'alimentation à pile à combustible produisent de l'électricité à la manière d'un groupe électrogène. Les seules émissions d'une pile à combustible sont les émissions de vapeur d'eau et de chaleur.

En outre, l'hydrogène peut être produit à partir de sources renouvelables, notamment l'énergie solaire, éolienne, hydroélectrique et géothermique. 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 à pile à combustible est une véritable source d'énergie « zéro émission ».

Le passage à une nouvelle source d'énergie est une entreprise de grande envergure. Dans le cas des piles à combustible destinées aux navires, l'infrastructure de ravitaillement et la disponibilité de l'hydrogène au sein des ports peuvent entraver le processus. Avant que les opérateurs ne puissent alimenter leurs navires à l'aide de piles à combustible, un certain nombre de perfectionnements s'imposent encore au niveau de la chaîne d'approvisionnement en hydrogène et de l'infrastructure de ravitaillement.

À plus court terme, les applications hybrides à batterie/pile à combustible sont viables. Elles nécessitent moins de carburant tout en respectant l'objectif « 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 les grands navires, tels que les bateaux de croisière, où les besoins en énergie auxiliaire sont élevés ;
- l'alimentation à quai des navires amarrés.

L'utilisation de piles à combustible dans les applications marines présente trois grands avantages :

- les systèmes d'alimentation modulaires répondent à de nombreuses exigences en matière de charge.



Figure 26. Module de pile à combustible marine Ballard de 100 kW

Les piles à combustible à membrane échangeuse de protons de Ballard sont modulaires (Figure 26). Elles peuvent être utilisées en parallèle dans diverses combinaisons pour fournir la puissance et la redondance nécessaires à un navire, de 100 kW à 1 MW ou plus.

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

Les piles à combustible à membrane échangeuse de protons de Ballard représentent une source d'énergie continue importante, compatible avec les architectures électriques hybrides à batterie. Elles peuvent être déployées dans des configurations parallèles et réparties pour répondre aux exigences de puissance variable :

- de la propulsion électrique hybride ;
 - des systèmes d'alimentation auxiliaires.
- Les systèmes de piles à combustible présentent une configuration flexible.

Dans un système de pile à combustible, les éléments de production d'énergie et de stockage du combustible sont séparés, ce qui confère à l'architecture du navire plus de flexibilité qu'avec des batteries. Le système d'alimentation à pile à combustible de Ballard présente une configuration flexible qui s'adapte aux contraintes d'espace du navire. Il peut être décomposé en plusieurs modules, placés à différents endroits. De plus, les experts de Ballard peuvent évaluer les cycles de service d'un navire de n'importe quel type ou de n'importe quelle taille. Ils sont en mesure de mettre au point une solution viable et pratique en déterminant :

- l'architecture hybride optimale ;
- l'alimentation à pile à combustible optimale ;

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

- les exigences en matière d'arrêt ;
- les exigences en matière de stockage de combustible ;
- la consommation estimée de combustible.

Les piles à combustible peuvent être utilisées sur différents types de navires, par exemple les ferries, les bateaux de croisière, les bateaux fluviaux, etc. Concernant les ferries, des systèmes de piles à combustible modulaires et évolutifs peuvent fournir une propulsion sans émissions aux petits et aux 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 alors de la durée et de l'horaire du trajet. Dans la mesure où 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 satisfaire 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 davantage d'efficacité, le surplus de chaleur généré par les piles à combustible peut être utilisé pour chauffer l'eau du système de chauffage, de ventilation et de climatisation, du système de blanchisserie ainsi qu'à d'autres fins. Le cas échéant, l'eau produite par la pile à combustible peut être récupérée.

Les applications liées aux bateaux de croisière pourraient figurer parmi les premières utilisations marines des piles à combustible. Certains ports de croisière exigent déjà un fonctionnement sans émissions. Sur les bateaux de croisière, les applications de piles à combustible comprennent la production d'électricité pour les installations hôtelières, les systèmes d'urgence et une partie de la puissance de propulsion. Pour que l'industrie atteigne ses objectifs d'émissions nulles d'ici la fin du siècle, les piles à combustible devraient fournir 100 % de l'énergie sur de nombreux bateaux de croisière, à mesure que l'infrastructure de l'hydrogène se développe.

Les piles à combustible constituent une solution viable pour la propulsion sans émissions 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 d'alimentation de navires fluviaux à Lyon, en France (Figure 27). Ce projet vise à alimenter un bateau-pousseur utilisé en tant que navire utilitaire sur l'un des fleuves les plus exigeants du monde, le Rhône.



Figure 27. Projet d'alimentation de navires fluviaux de Ballard à Lyon, en France

Afin de réduire la pollution atmosphérique et les émissions de carbone, les gouvernements, les autorités portuaires et les organisations du monde entier renforcent les normes relatives aux émissions des navires. En conséquence, l'industrie maritime se retrouve sous pression pour se conformer aux prochaines réglementations « zéro émission ». L'alimentation par piles à combustible à hydrogène offre de réelles perspectives pour divers navires. Il s'agit d'une solution à émissions nulles déjà éprouvée pour alimenter les bus de transport en commun, les camions et d'autres moyens de transport lourds. Alimentés par de l'hydrogène renouvelable, les systèmes de piles à combustible constituent la solution « zéro émission » la plus pratique et la plus viable. La mise en œuvre de cette technologie représente une étape essentielle de la réduction des émissions des navires et de l'assainissement de l'air pour un monde plus vivable.

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

La Greenenergy Box est un exemple de système de stockage d'énergie à base d'hydrogène. La Greenenergy BoxTM est une chaîne d'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 réservoirs d'hydrogène et d'oxygène. La Greenenergy BoxTM est un système modulaire intégré capable d'offrir une puissance de 50 à 500 kW ainsi qu'une capacité de stockage de 0,2 à 2 MW. Son principe de fonctionnement est illustré sur la [Figure 28](#). Plusieurs systèmes peuvent être couplés afin d'augmenter la puissance et la capacité énergétique tout en assurant la fonction de système de secours pendant quelques heures à forte puissance [1].

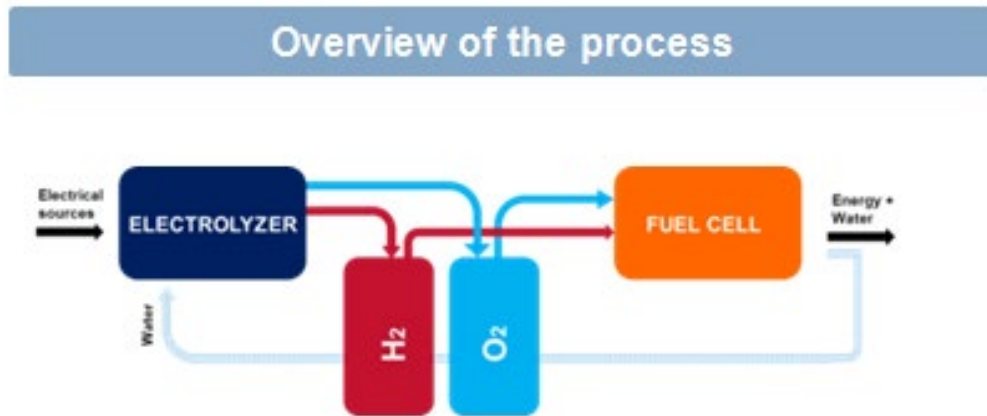


Figure 28. Vue d'ensemble du processus de la Greenenergy Box.

Les panneaux photovoltaïques fournissent de l'électricité au réseau électrique ; le surplus est utilisé par l'électrolyseur pour produire de l'hydrogène et de l'oxygène gazeux. Une fois produits, l'hydrogène et l'oxygène gazeux sont stockés dans des réservoirs distincts 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 du 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. En outre, la chaleur produite par le système lors des processus d'électrolyse et de pile à combustible est également gérée et valorisée pour les bâtiments adjacents. Étanche et résistante au vent, la Greenenergy BoxTM est composée de trois compartiments différents : un compartiment électrique, un compartiment pour la pile à combustible et un compartiment pour l'électrolyseur, comme le montre la Figure 29.

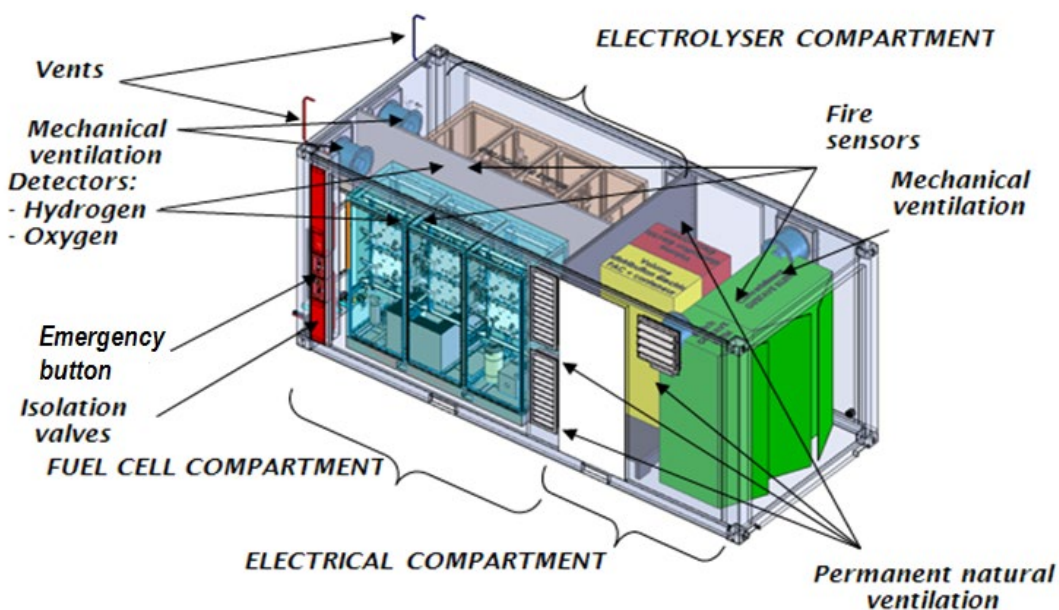


Figure 29. Schéma de la Greenenergy BoxTM [1]

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

Conformément à la Directive relative à la basse tension 73/23/CEE, à la Directive relative à la compatibilité électromagnétique 89/336/CEE, à la Directive relative aux machines 98/37/CE et à la Directive relative aux équipements sous pression 97/23/CE, la Greenenergy Box™ est certifiée CE. Pour ce système, l'évaluation des risques a lieu en trois étapes. Tout d'abord, un document intitulé « Considérations de base en matière de sécurité » est préparé. Il décrit les principales exigences de sécurité à respecter lors des étapes de l'architecture et de la conception de la chaîne d'hydrogène. Une fois que l'architecture du système est suffisamment détaillée, une étude HAZOP (portant sur les risques et l'exploitabilité) est réalisée pour chaque sous-système afin de définir les causes potentielles de chaque déviation du processus, les conséquences potentielles associées et d'évaluer les obstacles existants. Dans un troisième temps, une analyse par arbre de défaillance complète l'étude HAZOP pour mettre en évidence les défaillances de conception, les configurations inappropriées 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 d'hydrogène est détaillée dans les différentes sections ci-dessous.

- Élimination et contrôle des fuites.
 - Les matériaux des équipements et des tuyaux choisis sont compatibles avec l'hydrogène et l'oxygène. La fragilisation des matériaux par l'hydrogène et la corrosion par l'oxygène sont notamment prises en compte au moyen des normes IGC15/06, ISO/TR 15916 et ISO 11114-4. Les cylindres en acier sont couramment utilisés pour stocker l'hydrogène et l'oxygène sous pression. L'équivalent maximal en carbone est de 0,43 pour l'hydrogène, comme indiqué dans le document IGC 121/04, § 3.
 - Les raccords soudés sont privilégiés et s'avèrent très pratiques pour limiter les sources de fuites potentielles. Le nombre de joints et de raccords ajustés est réduit au minimum.
 - Les compartiments de l'électrolyseur et de la pile à combustible de la Greenenergy Box™ 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 d'hydrogène (0,4 % en volume d'H₂ dans l'air) et un arrêt d'urgence a lieu à 25 % de la limite inférieure d'inflammabilité (1 % en volume d'H₂ dans l'air). La détection d'oxygène se déclenche dès que la concentration en oxygène atteint plus de 23 % en volume dans l'air.
 - En outre, la différence de pression pendant les phases de veille permet également de détecter les fuites d'hydrogène et d'oxygène. Si un réservoir ou une portion de tuyau perd de la pression pendant une phase de veille, cela signifie potentiellement qu'il y a une fuite. S'il y a une perte de pression minimale pendant la phase de veille, une alarme se déclenche ; si la perte de pression est trop importante, le système ne pourra pas redémarrer.

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

- Conformément à la Directive relative aux équipements sous pression, des tests hydrauliques et d'étanchéité sont réalisés avant la mise en service.
 - Pour garantir un niveau de sécurité optimal, des inspections régulières et un programme d'entretien préventif sont mis en place. Des tests d'étanchéité réguliers sont notamment réalisés sur les régulateurs de pression, les vannes, les tuyaux, les joints et les raccords, etc. Des inspections visuelles sont effectuées régulièrement pour vérifier le niveau de corrosion. Les informations relatives à la fréquence des inspections et de l'entretien se trouvent dans les Annexes F des documents IGC 121/04 et IGC 13/02.
- Prévention de la formation d'atmosphères inflammables ou sur-oxygénées.
- Les trois compartiments de la Greenenergy BoxTM sont ventilés naturellement grâce à des événements latéraux situés de part et d'autre du réservoir (Figure 33).
 - Les compartiments de la pile à combustible et de l'électrolyseur sont tous deux équipés d'une ventilation de type ATEX qui se déclenche lorsque la concentration en hydrogène et en oxygène dépasse respectivement 0,4 % en volume d'hydrogène ou 23 % en volume d'oxygène dans l'air. Des débits maximaux sont fixés pour la dissipation thermique, soit 2 500 m³/h pour le compartiment de la pile à combustible et 2 700 m³/h pour le compartiment de l'électrolyseur.
 - À l'aide de la méthode de simulation à grande échelle (LES) développée par l'Université d'Ulster, il est possible de procéder à la modélisation d'une fuite accidentelle d'hydrogène présentant un débit de 750 L/min. Cela montre qu'il faut environ 10 secondes pour qu'un capteur d'hydrogène détecte une concentration en hydrogène supérieure à 0,4 % en volume dans le compartiment de l'électrolyseur ventilé naturellement. En tenant compte de l'hypothèse très prudente d'après laquelle le temps de réaction du capteur d'hydrogène est de 30 secondes, on peut observer qu'au bout de 40 secondes de libération constante et continue, la concentration en hydrogène sous le plafond est toujours inférieure à la limite inférieure d'inflammabilité de l'hydrogène dans l'air, à savoir moins de 4 % en volume dans l'air. À 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 la vitesse maximale. On constate que le nuage d'hydrogène dans l'air se dilue complètement en moins de 2 secondes.
- Élimination/réduction des sources d'inflammation.
- L'intérieur de la Greenenergy BoxTM, au sein duquel l'hydrogène peut fuir ou se diffuser, n'est pas classé puisque des barrières de sécurité garantissent l'absence d'hydrogène dangereux ATEX au niveau du point de fuite ou par accumulation. Néanmoins, tous les équipements installés juste en dessous du plafond du réservoir et capables d'enflammer un mélange hydrogène-air inflammable sont certifiés pour une utilisation dans les environnements dangereux ATEX Zone 2. Il s'agit notamment des

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

détecteurs d'incendie, des capteurs d'hydrogène et d'oxygène et du système de ventilation.

- À des fins de protection contre les risques de courants électriques vagabonds et d'électricité statique, la Greenenergy BoxTM et les réservoirs sont mis à la terre et reliés entre eux.
- Protection contre les surpressions.
 - Chaque réservoir et les conduites reliant la Greenenergy BoxTM aux réservoirs de stockage sont équipés d'une soupape de décharge de pression. La pression de tarage de la soupape de décharge de pression est réglée de façon à ce que la soupape se déclenche lorsque la pression dans le réservoir atteint 1,15 fois la pression de fonctionnement maximale.
 - Les événements du réservoir de stockage sont montés verticalement à une hauteur minimale de 3 m. Ils sont équipés d'un « chapeau » étalonné pour se soulever sous l'effet de la 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 réservoir et bien séparés pour éviter tout mélange hydrogène-air enrichi en oxygène. Chaque conduite de ventilation distincte est commune à l'électrolyseur et à la pile à combustible et permet de dépressuriser le système en moins de 2 minutes en cas d'arrêt d'urgence.
- Arrêt d'urgence et de sécurité.
 - 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 afin de détecter tout écart par rapport au processus, toute fuite de gaz 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 se déclenche, suivi de la coupure de l'alimentation, de la dépressurisation du système, de l'inertage et de l'activation de la ventilation (sauf en cas d'incendie).
 - Les principales fonctions de sécurité, à savoir la détection d'hydrogène, d'oxygène et d'incendie, le bouton d'arrêt d'urgence et le dispositif de type chien de garde de la commande de contrôle, sont réalisées par câblage logique et respectent le niveau de sécurité intégrée (SIL) 1 [1].

9. Vue d'ensemble des incidents et des accidents

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

Un incident est un événement qui est en mesure d'entraîner une perte ou une perturbation des opérations, des services ou des fonctions et qui, s'il n'est pas maîtrisé, peut dégénérer en situation d'urgence, en crise ou en catastrophe [43]. Un accident est un événement ou une circonstance imprévu(e) et non planifié(e) provoquant des pertes ou des blessures. Le signalement des incidents/accidents survenus sur les systèmes ou les infrastructures de PCH et l'évaluation complexe de leurs principales causes ainsi que des enseignements qui en ont été tirés constituent des exercices extrêmement utiles pour les secteurs privé et public. Très réputées, les bases de données suivantes contiennent des informations relatives aux accidents ou aux incidents liés aux technologies de PCH :

- Enseignements tirés des incidents et des incidents évités de justesse 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.jsp>
- Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industries (BARPI) <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/the-barpi/?lang=enbarpi/>

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

Par exemple, la base de données H2Incidents (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 incidents et les incidents évités de justesse peuvent être signalés sans mentionner le nom de l'entreprise ni d'autres informations détaillées, de manière à ce que l'anonymat encourage le signalement. 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.
- Surpression.
- Fragilisation par l'hydrogène à basse température.
- Explosion de vapeurs en expansion provenant d'un liquide en ébullition (BLEVE).
- Rupture du réservoir de stockage due à l'impact d'ondes de choc ou de projectiles provenant d'explosions adjacentes.
- Erreur humaine.

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

Dans ce premier cours, nous n'aborderons que quelques exemples d'incidents et accidents liés aux technologies de PCH. Toutefois, les cours suivants incluront un certain nombre d'exemples pertinents pour chaque système de PCH étudié.

9.2 Accidents survenus dans le cadre de la production d'hydrogène



Source : Millet et al, 2011 [45]

Figure 30. Pièces endommagées de l'électrolyseur à membrane échangeuse de protons haute pression

Le 7 décembre 2005, un électrolyseur a explosé à une pression de fonctionnement de 40 MPa sur un stand de démonstration d'hydrogène de l'Université de Kyushu (Japon) [44]. Il est possible qu'à la suite d'une fuite au niveau de la membrane, un incendie interne dû à un jet d'hydrogène-oxygène ait provoqué l'inflammation du métal (titane) puis l'explosion ou la rupture de l'enveloppe de l'électrolyseur. Le liquide interne et les produits de combustion ont été libérés dans les environs, y compris sur le parking situé 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 [44]. Une étude franco-russe [45] a analysé les mécanismes de défaillance des cellules électrolytiques à eau et à membrane échangeuse de protons, qui peuvent conduire à la destruction de l'électrolyseur. Un processus en deux étapes impliquant d'abord la perforation locale de l'électrolyte polymère solide puis la recombinaison catalytique de l'hydrogène et de l'oxygène stockés dans les compartiments d'électrolyse a été mis en évidence. Des photographies d'un raccord en acier inoxydable et d'un écrou perforés par une flamme d'hydrogène-oxygène formée à l'intérieur du bloc de piles à combustible à membrane échangeuse de protons sont présentées sur la Figure 30.

9.3 Incident survenu dans une station-service

Une libération d'hydrogène gazeux a eu lieu au sein de la station-service d'Emeryville [60]. Un dispositif de décompression s'est rompu, à la suite de quoi 300 kg d'hydrogène ont été libérés et se sont enflammés. Le gaz s'est enflammé à la sortie du tuyau de ventilation et a brûlé pendant 2,5 heures, jusqu'à ce que les techniciens soient autorisés par les pompiers locaux à entrer dans

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours la station et à interrompre le flux de gaz. Pendant cet incident, les pompiers ont évacué les entreprises et les écoles voisines et ont fermé les rues adjacentes.

Les causes profondes suivantes ont été identifiées :

- l'utilisation de matériaux incompatibles dans la fabrication du dispositif de décompression ;
- un assemblage incorrect entraînant un serrage excessif de l'assemblage interne ;
- le durcissement excessif des matériaux de l'assemblage interne par le fabricant de la vanne.

Si des procédures adéquates d'assurance qualité et de contrôle qualité avaient été suivies lors de l'analyse de la conception et de la sécurité, ces problèmes auraient pu être évités.

10. Présentation du cadre et des normes d'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène

L'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène est définie comme l'application de principes scientifiques et techniques à la protection des personnes, des biens et de l'environnement contre les effets néfastes des incidents et accidents impliquant de l'hydrogène [46]. Malgré les progrès réalisés dans le domaine de la science et de l'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène au cours de la dernière décennie, notamment grâce au partenariat HySafe [47], il n'existe toujours pas de méthodologie globale fondée sur les performances pour concrétiser nos aspirations. L'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène comprend un cadre de conception ainsi que des sous-systèmes techniques. Développé au sein de l'université d'Ulster, le cadre de conception est similaire à la norme britannique BS7974 relative à l'application des principes de sécurité anti-incendie à la conception des bâtiments [48] et est élargi pour refléter les phénomènes spécifiquement liés à la sécurité de l'hydrogène. Cela comprend notamment les fuites et la dispersion sous-détendues à haute pression, l'inflammation spontanée des libérations soudaines d'hydrogène dans l'air, les jets enflammés à forte inertie, les déflagrations et les détonations, les techniques d'atténuation, par exemple l'aération de la déflagration et la ventilation naturelle/forcée, etc. Le processus d'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène comprend trois principales étapes, comme l'indique la Figure 31.

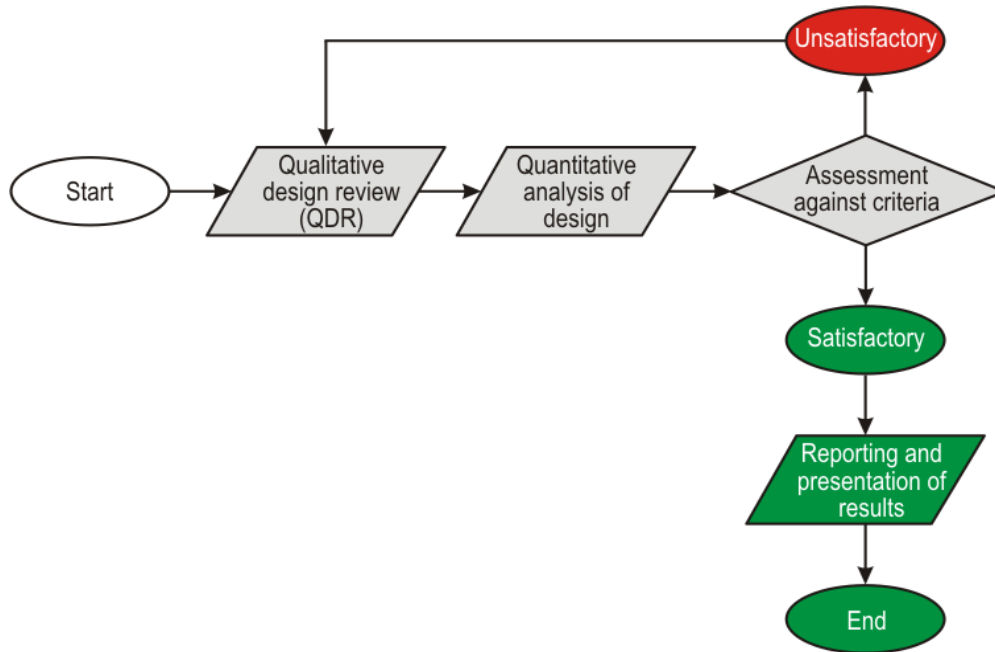


Figure 31. Étapes du processus d'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène [44]

Dans un premier temps, un examen qualitatif de la conception est entrepris par une équipe dont peut faire partie le propriétaire, l'ingénieur en sécurité de l'hydrogène, l'architecte, le représentant des autorités compétentes, par exemple des services d'urgence, ainsi que d'autres parties prenantes. L'équipe définit des scénarios d'accident, propose des concepts de sécurité expérimentaux et formule des critères d'acceptation. Deuxièmement, une analyse quantitative de la sécurité des scénarios sélectionnés et des concepts expérimentaux est menée à bien par un ou plusieurs ingénieurs en sécurité de l'hydrogène. Ces derniers disposent de connaissances avancées en matière de science et d'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène, ainsi que de modèles et d'outils validés. Troisièmement, dans le cadre des essais de sécurité, les performances d'un système de pile à combustible et/ou à hydrogène sont évaluées par rapport à des critères d'acceptation prédéfinis. L'examen qualitatif de la conception est un processus qualitatif fondé sur l'expérience et les connaissances de l'équipe. Il permet à ses membres d'établir une série de stratégies de sécurité. Dans l'idéal, l'examen qualitatif de la conception doit être systématiquement réalisé au début du processus de conception, de sorte que les résultats et les éléments pertinents puissent être intégrés dans la conception de l'application ou de l'infrastructure de PCH avant que les plans d'exécution ne soient élaborés. Dans la pratique, toutefois, le processus d'examen qualitatif de la conception est susceptible d'impliquer quelques itérations à mesure que le processus de conception passe d'un niveau général à un niveau plus détaillé. Les objectifs de sécurité doivent être définis au cours de l'examen qualitatif de la conception. Ils doivent être adaptés aux aspects spécifiques de la conception du système, car l'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène peut être utilisée soit pour développer une stratégie

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

complète de sécurité de l'hydrogène, soit pour prendre en compte un seul aspect de la conception. Les principaux objectifs de sécurité liés à l'hydrogène sont la sécurité des personnes, le contrôle des pertes et la protection de l'environnement. L'équipe chargée de l'examen qualitatif de la conception doit établir un ou plusieurs concepts de sécurité expérimentaux en tenant compte des scénarios d'accident sélectionnés. Les différents concepts peuvent répondre aux mêmes objectifs de sécurité et doivent être comparés en termes de rentabilité et de faisabilité. À première vue, il est essentiel que les concepts expérimentaux limitent les risques en instaurant des mesures de prévention et en réduisant la gravité ainsi que la fréquence des conséquences. Bien que l'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène offre un certain degré de liberté, il convient de respecter scrupuleusement les réglementations applicables lors de l'élaboration des concepts expérimentaux.

L'équipe chargée de l'examen qualitatif de la conception doit établir les critères d'acceptation sur la base desquels les performances d'un concept peuvent être évaluées. Il est possible d'utiliser trois principales méthodes : la méthode déterministe, la méthode comparative et la méthode probabiliste. L'équipe chargée de l'examen qualitatif de la conception peut, en fonction des concepts expérimentaux, définir des critères d'acceptation selon les trois méthodes. L'équipe chargée de l'examen qualitatif de la conception doit fournir un ensemble de résultats qualitatifs à utiliser dans le cadre de l'analyse quantitative : les résultats de l'examen architectural, les objectifs de sécurité liés à l'hydrogène, les dangers importants et les phénomènes associés, les spécifications des scénarios à analyser, un ou plusieurs concepts expérimentaux, les critères d'acceptation ainsi que les méthodes d'analyse suggérées. À l'issue de l'examen qualitatif de la conception, l'équipe doit décider quels concepts expérimentaux s'avèrent optimaux. Elle doit ensuite décider si une analyse quantitative est nécessaire pour démontrer que le concept répond aux objectifs de sécurité liés à l'hydrogène. À l'issue de l'examen qualitatif de la conception, une analyse quantitative peut être effectuée à l'aide de sous-systèmes techniques. Différents aspects de l'analyse peuvent être quantifiés par le biais d'une étude déterministe ou d'une étude probabiliste. L'examen qualitatif de la conception précède le processus de quantification pour deux raisons principales : pour s'assurer que le problème est parfaitement compris et que l'analyse porte sur les aspects pertinents du système de sécurité de l'hydrogène ; et pour simplifier le problème et limiter l'effort de calcul requis. En outre, l'équipe chargée de l'examen qualitatif de la conception doit identifier les méthodes d'analyse appropriées parmi les méthodes suivantes : calculs techniques simples, simulations de mécanique des fluides numérique, étude probabiliste simple, étude probabiliste complète, etc. Une étude déterministe utilisant des critères comparatifs nécessitera généralement moins de données et de ressources qu'une approche probabiliste et représentera probablement la méthode la plus simple pour parvenir à une conception acceptable. Une étude probabiliste complète n'est susceptible d'être justifiée qu'en cas d'adoption d'une approche fondamentalement inédite de la conception des systèmes d'hydrogène ou des pratiques de sécurité liées à l'hydrogène. L'analyse peut être composée d'éléments déterministes et probabilistes. À l'issue de l'analyse quantitative, les résultats doivent être comparés aux critères

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

d'acceptation identifiés au cours de l'examen qualitatif de la conception. Pour évaluer les performances du système de sécurité par rapport aux critères, trois types d'approche peuvent être envisagés :

- L'approche déterministe montre que, sur la base des hypothèses initiales, un ensemble défini de conditions ne se produira pas ;
- L'approche comparative montre que la conception offre un niveau de sécurité équivalent à celui de systèmes similaires et/ou qu'elle est conforme aux codes normatifs (en tant qu'alternative à l'approche d'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène fondée sur les performances) ;
- L'approche probabiliste montre que le risque qu'un événement donné se produise est acceptable, c'est-à-dire inférieur ou égal au risque établi pour des systèmes existants similaires.

Si aucun des concepts expérimentaux élaborés par l'équipe chargée de l'examen qualitatif de la conception ne satisfait aux critères d'acceptation spécifiés, le processus d'examen qualitatif de la conception et de quantification doit être répété jusqu'à ce qu'une stratégie de sécurité de l'hydrogène satisfasse aux critères d'acceptation ainsi qu'aux autres exigences de conception. Conformément aux recommandations, plusieurs options peuvent être envisagées lors du nouvel examen qualitatif de la conception [48] : l'élaboration de concepts expérimentaux supplémentaires ; l'adoption d'une approche de conception plus discriminante, par exemple en utilisant des techniques déterministes au lieu d'une étude comparative ; la réévaluation des objectifs de conception, par exemple si le coût des mesures de sécurité liées à l'hydrogène pour la prévention des pertes matérielles l'emporte sur les avantages potentiels. Lorsqu'une solution satisfaisante a été identifiée, la stratégie d'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène qui en découle doit être dûment documentée. En fonction des particularités et de la portée de l'étude d'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène, le rapport de résultats et de conclusions peut contenir les informations suivantes, conformément aux exigences [48] :

- Les objectifs de l'étude ;
- La description complète du système ou de l'infrastructure de PCH ;
- Les résultats de l'examen qualitatif de la conception ;
- L'analyse quantitative (hypothèses ; jugements techniques ; procédures de calcul ; validation des méthodes ; analyse de sensibilité) ;
- L'évaluation des résultats de l'analyse par rapport aux critères ;
- Les conclusions (stratégie de sécurité de l'hydrogène ; exigences en matière de gestion ; éventuelles restrictions d'utilisation) ;
- Les références (par exemple les dessins, la documentation de conception, la littérature technique, etc.). Pour simplifier l'évaluation d'un concept d'ingénierie de la sécurité de

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

l'hydrogène, le processus de quantification se décompose en plusieurs sous-systèmes techniques.

Lors de l'élaboration des différents sous-systèmes techniques, il convient de prendre en compte les exigences suivantes :

- Dans la mesure du possible, les sous-systèmes techniques doivent aborder tous les aspects possibles de l'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène ;
- Les sous-systèmes techniques doivent être équilibrés vis-à-vis de leur caractère unique ou de leur capacité à être utilisés individuellement, ainsi que de leurs complémentarités et synergies avec d'autres sous-systèmes techniques ;
- Les sous-systèmes techniques doivent inclure une sélection d'outils de pointe relevant du domaine de la sécurité de l'hydrogène. Il peut s'agir d'outils d'ingénierie validés, y compris de corrélations empiriques et semi-empiriques et d'outils contemporains tels que les modèles et les codes de mécanique des fluides numérique ;
- Pour permettre la mise à jour des méthodes existantes ou l'utilisation de nouvelles méthodes appropriées et validées, les sous-systèmes techniques doivent être flexibles et refléter les récentes avancées de la science et de l'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène.

Les sous-systèmes techniques suivants sont actuellement suggérés et en cours d'élaboration [46] :

- Sous-système technique 1 : début de la libération et de la dispersion ;
- Sous-système technique 2 : inflammations ;
- Sous-système technique 3 : déflagrations et détonations ;
- Sous-système technique 4 : incendies ;
- Sous-système technique 5 : impact sur les personnes, les biens et l'environnement ;
- Sous-système technique 6 : techniques d'atténuation ;
- Sous-système technique 7 : intervention des services d'urgence.

L'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène est la clé du succès de l'économie de l'hydrogène. Il s'agit d'un outil puissant qui permet, avec la contribution de spécialistes qualifiés, d'assurer la sécurité de l'hydrogène sur le marché en pleine croissance des systèmes et infrastructures de PCH. Enfin, la sécurité de l'hydrogène assure la compétitivité des produits à base d'hydrogène et de piles à combustible.

11. Présentation de l'e-Laboratoire

Dans le secteur en plein essor des piles à combustible et à hydrogène (PCH), l'éducation et la formation sont essentielles au développement professionnel de la main-d'œuvre d'aujourd'hui et de demain. Cela sous-tend le leadership et la compétitivité des produits européens dans ce

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

domaine. Un référentiel en ligne d'outils numériques, l'e-Laboratoire, a tout d'abord été développé dans le cadre du projet européen « Novel Education and Training Tools based on digital Applications related to Hydrogen and Fuel Cell Technology » (NET-Tools). L'e-Laboratoire NET-Tools 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 de l'e-Laboratoire NET-Tools pour la sécurité de l'hydrogène, accessible via la plateforme électronique HyResponder (<https://hyresponder.eu/e-platform/>) ou directement à l'adresse <https://elab.hysafer.ulster.ac.uk/>

Le calcul des distances de sécurité basé sur les performances, terme récemment introduit par la norme ISO TC197 relative aux technologies de l'hydrogène, est un élément clé de l'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène pour les systèmes et infrastructures de PCH, par exemple les stations-service. Les principes qui sous-tendent l'e-Laboratoire pour la sécurité de l'hydrogène permettent d'évaluer les distances de sécurité pour les libérations non enflammées (taille du panache inflammable), les libérations enflammées (jets enflammés) et la désintégration de l'onde de choc issue des déflagrations, des détonations et de la rupture du réservoir de stockage d'hydrogène à haute pression dans le contexte d'un incendie, de boules de feu, etc. Longtemps attendue par l'industrie de l'hydrogène, cette boîte à outils sert à déterminer les distances de sécurité liées aux libérations non enflammées et aux jets enflammés en régime interactif, par exemple en faisant varier certains paramètres du système tels que la pression et le diamètre des tuyaux (fuites). Les outils de sécurité de pointe de l'e-Laboratoire pour la sécurité de l'hydrogène constituent l'équivalent européen en libre accès de l'outil HyRAM (méthodes d'évaluation des risques liés à l'hydrogène), qui a été élaboré par les laboratoires américains Sandia (SNL) au cours de la dernière décennie grâce au financement du Ministère américain de l'énergie. L'e-Laboratoire NET-Tools démontre le leadership européen en matière d'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène. Il explique par exemple comment calculer les distances de sécurité 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 dans le contexte d'un incendie, ce que l'outil HyRAM ne permet pas. Un cadre canadien similaire (UTRQ) a été mis en œuvre à l'aide de l'environnement de développement Web Smalltalk Seaside.

11.1 Principes scientifiques

Cette section décrit les principes scientifiques qui sous-tendent les outils d'ingénierie de l'e-Laboratoire pour la sécurité de l'hydrogène. Les outils sont regroupés en fonction de la similitude des applications.

11.1.1 Libérations non enflammées

La théorie des jets sous-détendus [44, 49] est à l'origine des « paramètres de jet » et d'autres outils liés aux jets sous-détendus. Elle permet de calculer les paramètres d'écoulement de l'hydrogène dans des buses réelles et théoriques. Pour calculer la baisse de la concentration dans un jet d'hydrogène à l'aide de la loi de similitude [54, 50], il faut connaître la densité au

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

niveau de la buse réelle ainsi que les paramètres au niveau de la buse théorique, qui sont largement utilisés en tant que conditions restrictives dans le contexte des simulations de mécanique des fluides numérique. Cet outil permet de calculer le débit massique de l'hydrogène à haute pression libéré à travers un trou du réservoir de stockage et un canal étroit sujet aux pertes. L'outil de prévision de la baisse de la concentration axiale d'une fuite d'hydrogène pour les jets subsoniques, soniques et supersoniques utilise la loi de similitude. Cette dernière est valable dans de nombreuses conditions, des jets détendus aux jets fortement sous-détendus [44]. Cet outil calcule la distance de sécurité, c'est-à-dire la longueur du panache inflammable, pour les jets dominés par l'inertie. Ces derniers représentent pratiquement toutes les libérations réalistes provenant des équipements de stockage d'hydrogène à haute pression.

La théorie des jets sous-détendus est utilisée pour élaborer et valider la loi de similitude universelle, décrite dans la section suivante, qui est valable aussi bien pour les jets détendus que sous-détendus dans le régime contrôlé par l'inertie. Cette théorie est appliquée pour dériver : la corrélation universelle de la longueur de flamme des jets d'hydrogène, l'outil de calcul du temps de purge de l'hydrogène libéré à partir du réservoir de stockage, etc. Elle est essentielle pour mener à bien l'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène dans différentes applications.

11.1.2 Loi de similitude

Il convient de noter que les effets thermiques des jets enflammés, les effets de pression des déflagrations ou des détonations et les effets thermiques et de pression des ruptures des réservoirs de stockage à haute pression dans le contexte d'un incendie (onde de choc et boule de feu) peuvent l'emporter sur la distance de sécurité déterminée par la taille du panache inflammable ou les distances de sécurité d'un jet enflammé. Il est donc essentiel, aux fins de l'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène, de connaître les lois décrivant la dispersion de l'hydrogène et la formation de nuages inflammables, y compris la baisse de la concentration axiale des jets arbitraires.

La Figure 32 représente la loi de similitude (dérivation et présentation) dans le cadre de la prédiction de la baisse de la concentration axiale d'une fuite de gaz pour les jets subsoniques, soniques et supersoniques [44, 50]. Elle est valable dans de nombreuses conditions, des jets détendus aux jets fortement sous-détendus. Elle peut être appliquée pour calculer les distances de sécurité en fonction de la taille du panache inflammable. Le comportement non idéal de l'hydrogène à haute pression et l'expansion réduite de l'écoulement à la sortie de la buse sont pris en compte en utilisant l'équation d'état d'Abel-Noble pour un gaz réel.

Pour les jets d'hydrogène dans l'air stagnant pour une concentration fixe exprimée en pourcentage de la masse C_{ax} , le rapport entre une distance, L , et le diamètre de la buse est une constante, à savoir $L/d = \text{const.}$. Cela signifie que la distance jusqu'à la limite inférieure d'inflammabilité (distance de sécurité) est directement proportionnelle au diamètre de la fuite. Ainsi, dans un scénario très prudent de rupture complète, les systèmes de piles à combustible

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours et à hydrogène doivent être conçus en gardant à l'esprit qu'il convient de limiter le diamètre interne des tuyaux, c'est-à-dire la taille de la fuite, tout en respectant les exigences technologiques en matière de débit massique.

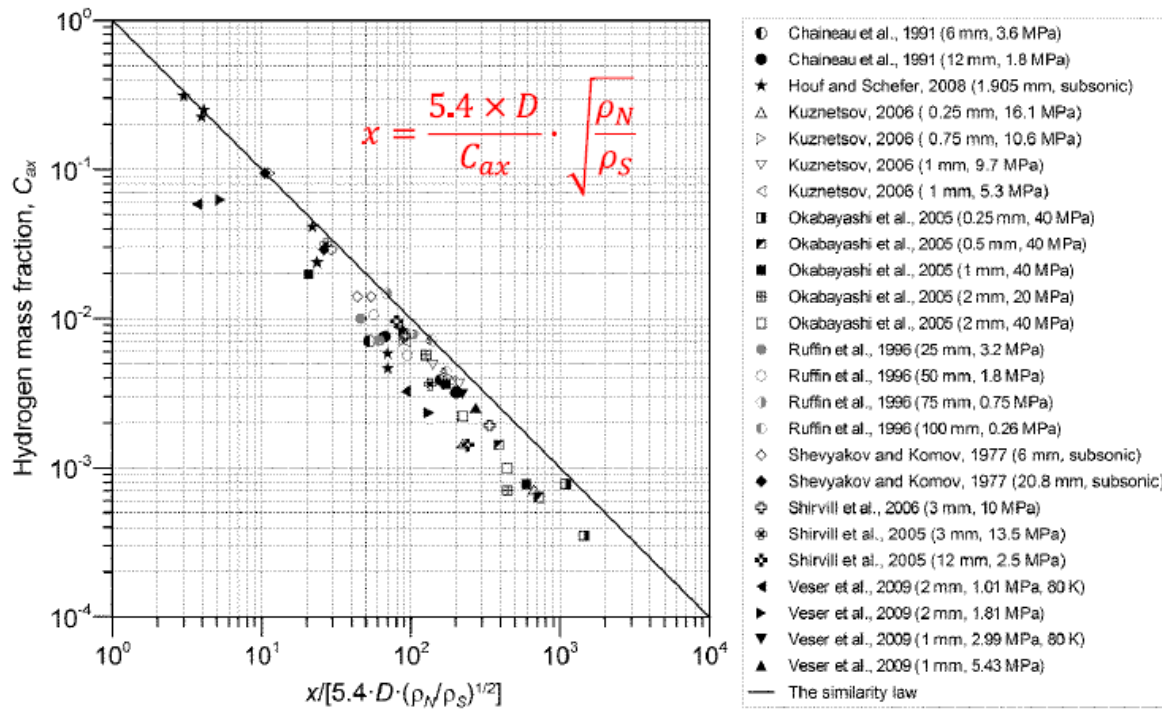


Figure 32. Loi de similitude [44]

11.1.3 Effet de flottabilité

L'outil « Effet de flottabilité » permet de calculer la réduction de la distance de sécurité des jets d'hydrogène initialement dominés par l'inertie lorsqu'ils se transforment en jets contrôlés par la flottabilité. Il est fondé sur la théorie de Shevyakov et a été validé au moyen d'expériences décrites dans d'autres documents [44]. La technique d'ingénierie [44] spécifie quelle partie du jet d'hydrogène (aussi bien détendu que sous-détendu) est contrôlée par l'inertie ; le reste du jet en aval est contrôlé par la flottabilité.

En fonction du rôle de la flottabilité, il existe trois types de jets. Ceux-ci sont illustrés sur la Figure 33 (à gauche) : les jets entièrement contrôlés par l'inertie ne sont pas affectés par la flottabilité ; les jets entièrement contrôlés par la flottabilité passent rapidement d'une direction d'écoulement horizontale à verticale ; le troisième type de jets est transitionnel et comporte une partie dominée par l'inertie plus près de la buse et un écoulement contrôlé par la flottabilité plus en aval, lorsque la vitesse du jet diminue et que le diamètre augmente. Aux fins de l'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène, il est important de savoir quand a lieu cette transition. Cela a une incidence directe sur la distance de sécurité et donc sur le coût de l'infrastructure.

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

La Figure 33 (à droite) présente cinq courbes théoriques (lignes continues) et des données expérimentales concernant les jets détendus, ainsi que des données issues d'autres recherches concernant les jets sous-détendus. Dans le contexte des incidents et accidents liés à l'hydrogène, pratiquement tous les jets sous-détendus se trouveront dans le régime contrôlé par l'inertie, comme le montrent les essais employés pour valider la corrélation. Quatre des cinq courbes théoriques du graphique sont liées à des concentrations en hydrogène de 4 %, 17 %, 30 % et 60 % en volume. Chacune de ces quatre courbes comporte une partie flottante ascendante et une partie inerte « en plateau ». La cinquième courbe, celle des « jets orientés vers le bas », est particulièrement intéressante. Cela donne, pour un jet dirigé verticalement vers le bas, une distance sans dimension entre la buse et le point d'inflexion où le jet change de direction, passant d'un écoulement vers le bas à un écoulement vers le haut. La cinquième courbe croise chacune des quatre autres courbes du graphique dans la zone de transition entre un écoulement dominé par l'inertie et un écoulement contrôlé par la flottabilité, comme prévu.

La technique de la Figure 33 (à droite) est facile à appliquer et peut s'avérer très utile pour élaborer des solutions rentables en matière d'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène. Par exemple, la distance de sécurité associée à un jet horizontal peut être considérablement réduite car seule la longueur de la partie du jet dominée par l'inertie peut être considérée comme une indication de la séparation plutôt que la distance agrégée, c'est-à-dire les parties du jet contrôlées par l'inertie et la flottabilité jusqu'à la limite inférieure d'inflammabilité de 4 % en volume d'hydrogène.

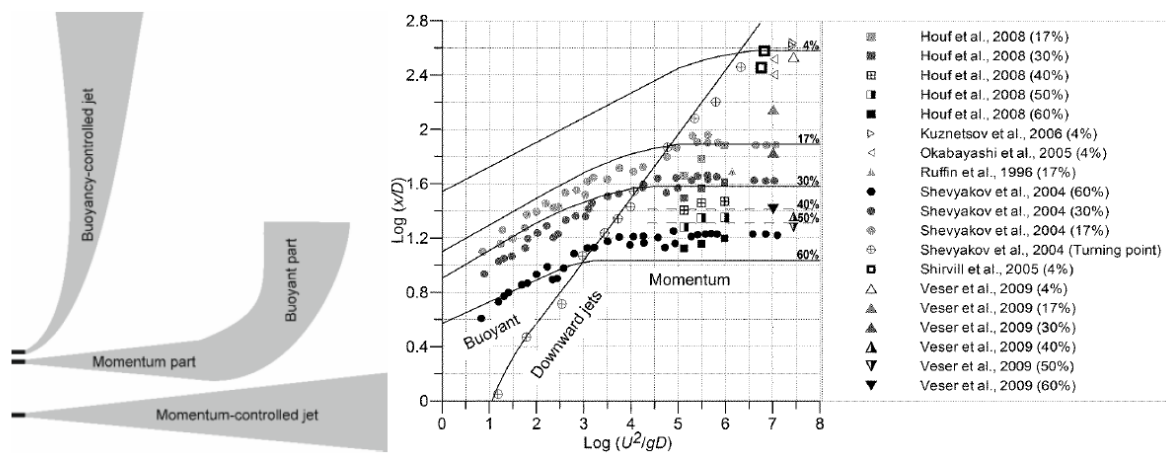


Figure 33. Types de jets en fonction du rôle de la flottabilité (à gauche) ; rapport entre la distance et le diamètre de la buse x/D pour une concentration en hydrogène dans l'air spécifique en fonction du nombre de Froude (à droite).

11.1.4 Purge

L'outil de « purge du réservoir de stockage » permet de calculer la dynamique de pression à l'intérieur du réservoir, dans le cadre d'une libération ayant lieu dans des conditions adiabatiques et isothermes qui peuvent être combinées afin de reproduire une dynamique de

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

purge plus proche de la réalité. Les deux modèles donnent des dynamiques de pression proches mais des dynamiques de température différentes pour l'hydrogène libéré.

Le modèle de purge adiabatique est fondé sur l'hypothèse d'une libération rapide à partir d'un réservoir à haute pression et d'effets de transfert thermique négligeables sur la température de l'hydrogène libéré. Le modèle adiabatique donne une température de l'hydrogène libéré plus basse à la fin du processus. En revanche, la purge isotherme d'un réservoir de stockage suppose une libération relativement longue à partir d'un réservoir à haute pression, de sorte que le transfert thermique modifie considérablement la température de l'hydrogène sortant. La combinaison d'un modèle adiabatique au début et d'un modèle isotherme par la suite donne une bonne approximation de la dynamique de température de l'hydrogène libéré observée dans le cadre des expériences.

Ces deux modèles reposent sur le modèle de paramètres des jets détendus et sous-détendus. Ce dernier décrit les paramètres d'un jet détendu et sous-détendu à travers les étapes caractéristiques de son développement - dans le réservoir de stockage, l'orifice et au niveau de la sortie théorique (effective) de la buse - et utilise l'équation d'état d'Abel-Noble ainsi que les équations de conservation de la masse et de l'énergie.

Cet outil peut être utilisé pour formuler des mesures d'atténuation et des stratégies de sécurité fondées sur le degré de résistance au feu du réservoir de stockage d'hydrogène embarqué. Afin d'éviter toute défaillance catastrophique en cas d'incendie, le degré de résistance au feu doit être supérieur à la somme du temps d'activation du dispositif de décompression thermique (DDT) et du temps de purge du réservoir de stockage. Évidemment, l'utilisation d'un dispositif de décompression thermique de plus grand diamètre crée un nuage inflammable ou une flamme-jet plus important(e). Cela génère une surpression plus élevée lors de « l'inflammation retardée » ou de la déflagration du nuage inflammable turbulent. Pour cette raison, il convient de réduire le plus possible le diamètre du dispositif de décompression, à condition que le degré de résistance au feu augmente en conséquence.

11.1.5 Ventilation passive

L'outil de « ventilation passive » permet de calculer la concentration en hydrogène, pour un taux de libération donné, dans un espace clos dont la taille de l'événement est connue ou de résoudre le problème en procédant à l'inverse (calculer la taille de l'événement pour maintenir la concentration sous le niveau souhaitable pour un taux de libération d'hydrogène connu).

Le modèle a été développé en supposant que le mélange était parfait. Par ailleurs, les équations liées à la ventilation passive (libération de gaz inflammable ou toxique) et naturelle (problèmes de qualité de l'air) ont été comparées [51] afin d'illustrer la principale différence entre les deux approches. Les équations liées à la ventilation naturelle dérivent généralement de l'hypothèse où le plan neutre se situe à la moitié de la hauteur de l'événement. En revanche, pour la ventilation passive en cas de libération accidentelle dans un espace clos, le plan neutre peut être situé n'importe où sous la moitié de la hauteur de l'événement. L'élaboration du modèle de

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

ventilation passive démontre que la solution analytique précise liée à la ventilation passive diffère de la solution approximative liée à la ventilation naturelle de plus de 2 fois pour les mélanges pauvres et riches, comme le montre la Figure 34, où X correspond à la fraction molaire d'hydrogène.

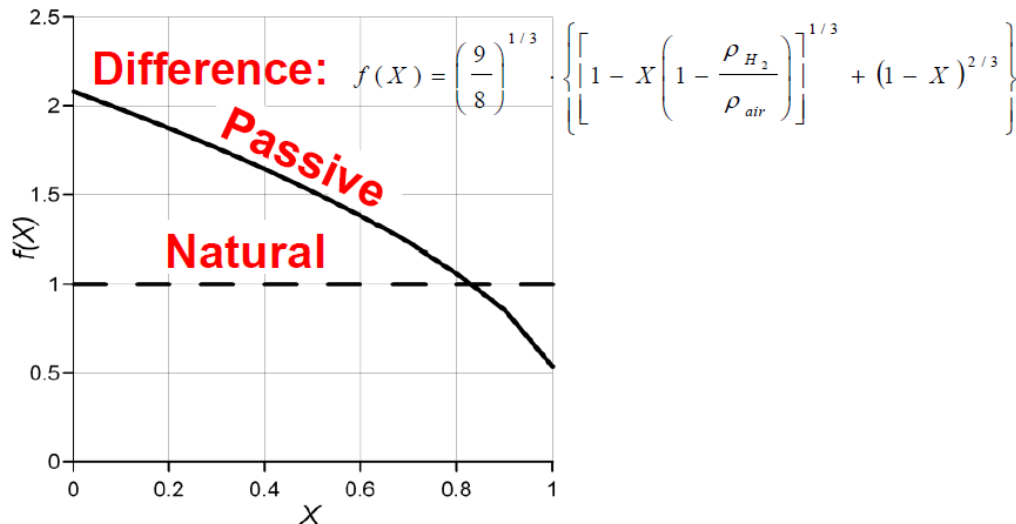


Figure 34. Différence entre la ventilation passive et la ventilation naturelle

Cette question peut avoir de graves conséquences sur la sécurité et doit faire l'objet d'une attention particulière lors des processus d'ingénierie de la sécurité impliquant des libérations d'hydrogène. La théorie de la ventilation passive stipule que, sur une même surface, un événement vertical est plus efficace qu'un événement horizontal ; cela doit être pris en compte lors de la conception des systèmes de ventilation passive.

11.1.6 Ventilation forcée

L'outil de « ventilation forcée » permet de calculer les paramètres du système de ventilation mécanique afin de maintenir la concentration en hydrogène sous le niveau requis. Les paramètres comprennent le débit volumique d'air nécessaire pour que le débit massique d'hydrogène soit inférieur à la limite spécifiée, dans l'hypothèse d'un mélange parfait. Le modèle est fondé sur les principes de la ventilation passive et sur le calcul du débit de ventilation nécessaire pour que la concentration en hydrogène soit inférieure au niveau requis dans un espace clos. L'application de la ventilation forcée dans le cadre d'expériences numériques a confirmé les calculs et a mis en évidence une baisse de la concentration en gaz jusqu'au niveau requis. Cela confirme que la méthode proposée peut être employée pour calculer le taux de ventilation des systèmes de piles à combustible et à hydrogène et peut être utilisée en tant qu'outil d'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène.

11.1.7 Phénomène de pic de pression

Contrairement aux autres logiciels similaires d'évaluation des risques et des dangers, l'e-Laboratoire pour la sécurité de l'hydrogène tient compte du phénomène de pic de pression (PPP), découvert en 2010 au sein de l'Université d'Ulster [52]. Ce phénomène permet de

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

calculer la dynamique de pression dans un espace clos tel qu'un garage en cas de libération imprévue d'hydrogène. Il est possible de choisir entre la libération d'hydrogène par purge et la libération à débit massique constant. Cet outil peut être utilisé dans le cas des libérations enflammées (incendie provenant du dispositif de décompression thermique) et non enflammées (défaillance du dispositif de décompression thermique).

Le phénomène de pic de pression n'est caractéristique que des gaz plus légers que l'air, lorsqu'ils sont libérés dans un espace clos dont la surface des événements est limitée. Le phénomène de pic de pression est plus prononcé pour les libérations enflammées que pour les libérations non enflammées provenant de la même source [53] ; reportez-vous à la Figure 35. Dans le cadre de l'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène en vue de l'utilisation de systèmes de piles à combustible et à hydrogène en intérieur, la norme ISO applicable exige que le phénomène de pic de pression soit pris en compte.

Seule la réduction du débit massique du dispositif de décompression thermique, c'est-à-dire du diamètre de sa buse, permet de prévenir et d'atténuer le phénomène de pic de pression. Pour ce faire, les réservoirs de stockage embarqués doivent présenter un degré de résistance au feu plus élevé.

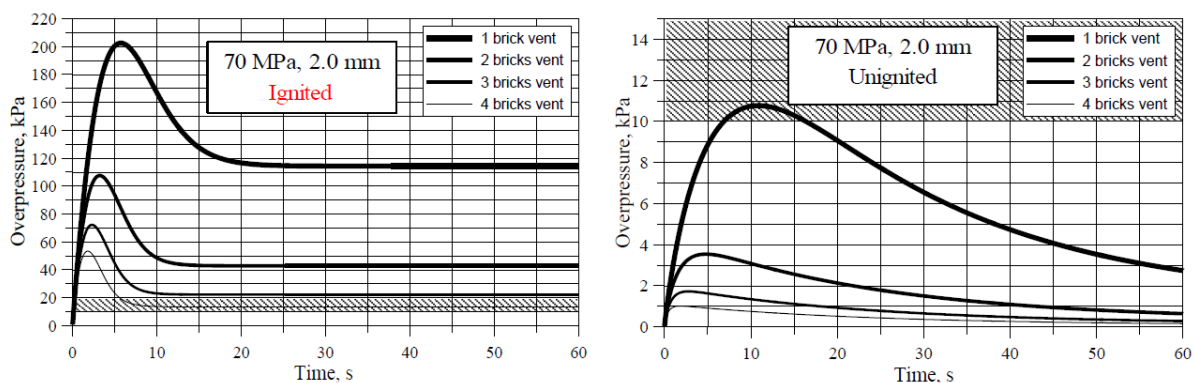


Figure 35. Dynamique de surpression d'un jet enflammé d'hydrogène dans un garage : dispositif de décompression thermique présentant un diamètre de 2 mm et une pression de stockage de 70 MPa (taux de libération de 107 g/s) ; enflammé (à gauche) et non enflammé (à droite) [53].

11.1.8 Distances de sécurité liées au jet enflammé

L'outil de « jet enflammé » utilise la corrélation de la longueur de flamme d'hydrogène sans dimension [50] pour calculer trois distances de sécurité, à savoir la distance « sans préjudice » jusqu'à $T=70\text{ °C}$, qui équivaut à 3,5 fois la longueur de la flamme ; la « limite de douleur » (115 °C , 5 minutes), qui équivaut à 3 fois la longueur de la flamme ; et la « limite de mortalité » (309 °C , 20 secondes), qui équivaut à 2 fois la longueur de la flamme. La corrélation de la longueur de flamme universelle comprend les flammes laminaires et turbulentes, les incendies contrôlés par la flottabilité et l'inertie, les jets enflammés détendus (subsoniques et soniques)

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

et sous-détendus (soniques et supersoniques), couvrant ainsi l'ensemble des fuites réagissant à l'hydrogène [50]. Les résultats théoriques et expérimentaux indiquent que la longueur de flamme doit non seulement dépendre du nombre de Froude (Fr), mais également du nombre de Reynolds (Re) et du nombre de Mach (M) ; dans cette corrélation, tous ces éléments sont pris en compte. L'un de ses avantages est l'absence de paramètres à la sortie de la buse théorique, qui dérivent de l'hypothèse d'un écoulement sonique au niveau de la buse théorique, dont le domaine de validité est limité. Les paramètres nécessaires pour prédire la longueur de flamme sont uniquement ceux qui concernent la sortie de la buse réelle : diamètre, densité et vitesse d'écoulement de l'hydrogène, vitesse du son à la pression et à la température à la sortie de la buse réelle. Pour la longueur de flamme des jets d'hydrogène dans l'air statique, la corrélation sans dimension correspond à $L_F/D - (\rho_N/\rho_S)(U_N/C_N)^3$; elle est illustrée sur la Figure 36. Ici, L_F correspond à la longueur de flamme, D correspond au diamètre de la buse, ρ_N et ρ_S correspondent aux densités de libération respectives au niveau de la buse et dans l'air environnant, tandis que U_N et C_N correspondent à la vitesse au niveau de la buse et à la vitesse du son au niveau du gaz libéré dans la buse.

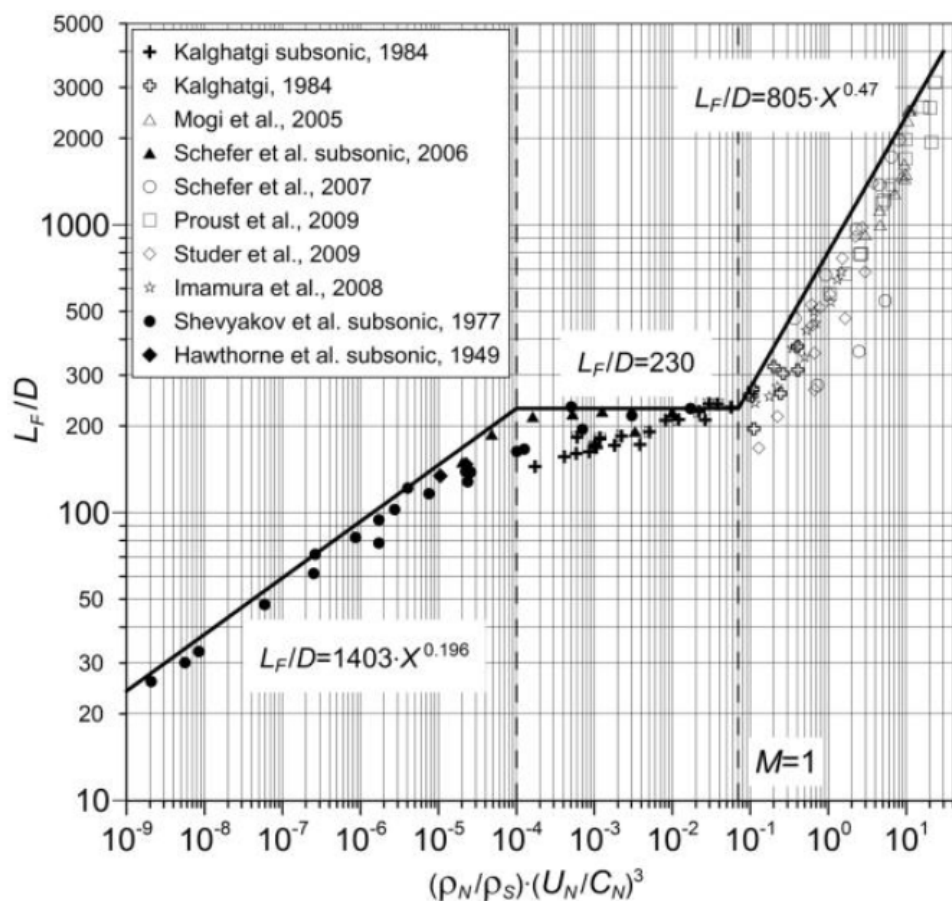


Figure 36. Corrélation de la longueur de flamme sans dimension [50]

L'utilisation de la corrélation requiert d'appliquer une théorie des jets sous-détendus pour calculer ces paramètres. Le calcul des paramètres d'écoulement revêt moins d'incertitude au niveau de la sortie de la buse réelle qu'au niveau de la buse théorique. En effet, la forte non-

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

uniformité de la vitesse en aval du disque de Mach s'écarte de l'hypothèse commune à toutes les théories des jets sous-détendus selon laquelle il existe une vitesse uniforme à la sortie de la buse théorique.

11.1.9 Atténuation des déflagrations

Dans l'e-Laboratoire pour la sécurité de l'hydrogène, il existe trois outils d'atténuation des déflagrations : le dimensionnement des événements d'un espace clos contenant un mélange hydrogène-air uniforme [54], le dimensionnement des événements d'un espace clos contenant un mélange localisé non uniforme [55] et le calcul de la limite supérieure du stock d'hydrogène qui peut être autorisé dans un espace fermé tel qu'un entrepôt [55].

Dans le cas d'un mélange hydrogène-air uniforme dans un espace clos ventilé [54], la corrélation du dimensionnement des événements est fondée sur les récentes avancées en matière de compréhension et de modélisation des phénomènes de combustion pertinents pour les déflagrations hydrogène-air ventilées, ainsi que sur des essais uniques réalisés à grande échelle par différents groupes de recherche. La corrélation tient notamment compte des phénomènes de combustion suivants : la turbulence produite par le front de flamme lui-même ; le mécanisme de points d'attaque découlant de la diffusion préférentielle de l'hydrogène dans l'air des flammes étirées ; la croissance de la zone fractale de la superficie de la flamme turbulente ; la turbulence initiale dans le mélange inflammable ; ainsi que les effets du rapport hauteur/largeur de l'espace clos et des éventuels obstacles. Cet outil permet de calculer la surface de l'événement afin de réduire la pression de déflagration à la limite souhaitée et d'estimer la surpression à l'intérieur de l'espace clos ventilé pour un événement d'une taille donnée.

Le modèle destiné aux mélanges localisés non uniformes [55] décrit les déflagrations de mélanges hydrogène-air et définit les exigences de sécurité liées aux déflagrations ventilées de mélanges localisés dans un espace clos. Parmi les exemples de mélanges localisés, on peut citer les « poches » de gaz à l'intérieur d'un espace clos ainsi que les distributions de gaz stratifiées, qui sont particulièrement pertinentes à l'égard des libérations d'hydrogène. Ce modèle permet d'estimer la surpression maximale à l'intérieur d'un espace clos ventilé et de calculer la taille de l'événement afin de ne pas dépasser la limite de sécurité requise.

Un modèle thermodynamique a également été mis au point [55] et est utilisé en tant qu'outil de l'e-Laboratoire. Il permet de prédire la masse maximale d'hydrogène qui peut être libérée dans un espace clos d'un volume donné sans provoquer de surpression de déflagration destructrice. Ce modèle suppose que l'espace clos est partiellement rempli d'air et d'un mélange hydrogène-air. Si ce mélange hydrogène-air est brûlé dans un espace hermétiquement clos, il est possible de déterminer la solution du modèle pour la pression absolue qui en découle. Cet outil permet de calculer la masse de réserve pour une certaine surpression et un certain volume de l'espace clos ainsi que le volume de l'espace clos pour une certaine surpression et une certaine masse de réserve.

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

11.1.10 Onde de choc et boule de feu suite à la rupture d'un réservoir dans le contexte d'un incendie

L'outil de baisse de la surpression de l'« onde de choc » est disponible pour les scénarios impliquant un réservoir de stockage autonome ou situé sous le véhicule. Le modèle élaboré tient compte des effets réels du gaz et de la combustion du gaz inflammable libéré dans l'air (énergie chimique) en tant que facteurs de contribution à la force de l'onde de choc [56]. L'énergie chimique issue de la combustion est combinée de manière dynamique à l'énergie mécanique et est prise en compte dans la distance non dimensionnelle à l'échelle de l'énergie. Ce modèle peut être utilisé en tant qu'outil d'ingénierie de la sécurité dans les applications classiques de stockage de l'hydrogène, notamment les réservoirs de stockage embarqués dans les véhicules et les réservoirs autonomes des stations-service. Il s'agit d'un modèle prédictif de calcul des distances de sécurité définies par les paramètres d'une onde de choc produite par la rupture d'un réservoir de stockage de gaz à haute pression dans le contexte d'un incendie.

L'outil de calcul du diamètre de la « boule de feu » suite à la rupture d'un réservoir d'hydrogène dans le contexte d'un incendie repose sur l'hypothèse d'une combustion complète de l'hydrogène libéré dans l'air [56, 57]. Il est fondé sur une quantité limitée de données expérimentales et requiert par conséquent une validation plus poussée.

11.2 Récapitulatif de l'e-Laboratoire

Les principes scientifiques qui sous-tendent les outils d'ingénierie de l'e-Laboratoire pour la sécurité de l'hydrogène (disponible à l'adresse <https://hyresponder.eu/e-platform/>) sont passés en revue. Les outils d'ingénierie élaborés sont mis en œuvre pour que les parties prenantes puissent y accéder librement. Les modèles mis en œuvre dans les outils en ligne sont fondés sur des publications évaluées par des pairs et validés au moyen d'expériences.

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.
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

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

18. Koroneos, C. J., & Moussiopoulos, N. (2002). Cryoplane –hydrogen vs. kerosene as aircraft fuel. Proceedings of the Geophysical Society XXVII General Assembly, Nice, France, p. 21-26.
19. Contreras, A., Yiğit,., Özay, K., & Veziroğlu, T. N. (1997). Hydrogen as aviation fuel: a comparison with hydrocarbon fuels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 22: 1053-1060
20. Lee DS, Pitari G, Grewe V, Gierens K, Penner JE, Petzold A, Prather MJ, Schumann U, Bais A, Bernsten T, Iachetti D, Lim LL, Sausen R. Transport impacts on atmosphere and climate: aviation. *Atmos Environ* 2010;44(37):4678–734
21. Contreras A, Yiğit S, Özay K, Veziroğlu TN. Hydrogen as aviation fuel: a comparison with hydrocarbon fuels. *Int J Hydrog Energy* 1997;22(10–11):1053–60.
22. Khandelwal B, Karakurt A, Sekaran PR, Sethi V, Singh R. Hydrogen powered aircraft: the future of air transport. *Prog Aerosp Sci* 2013;60:45–59.
23. Verstraete D. Long range transport aircraft using hydrogen fuel. *Int J Hydrog Energy* 2013;38(34):14824–31.
24. Verstraete D. The potential of liquid hydrogen for long range aircraft propulsion; 2009
25. Sharpe JE, Bimbo N, Ting VP, Rechain B, Joubert E, Mays TJ. Modelling the potential of adsorbed hydrogen for use in aviation. *Microporous Mesoporous Mater* 2015;209:135–40
26. Nojoumi H, Dincer I, Naterer GF. Greenhouse gas emissions assessment of hydrogen and kerosene-fueled aircraft propulsion. *Int J Hydrog Energy* 2009;34(3):1363–9
27. Cecere D, Giacomazzi E, Ingenito A. A review on hydrogen industrial aerospace applications. *Int J Hydrog Energy* 2014;39(20):10731–47
28. Verstraete D. On the energy efficiency of hydrogen-fuelled transport aircraft. *Int J Hydrog Energy* 2015;40(23):7388–94.
29. Fernandes MD, de ST, Andrade P, Bistrizki VN, Fonseca RM, Zacarias LG, Gonçalves HNC, de Castro AF, Domingues RZ, Matencio T. SOFC-APU systems for aircraft: a review. *Int J Hydrog Energy* 2018;43(33):16311–33
30. S Eelman, de Poza, Krieg T. Fuel cell APU'S in commercial aircraft – an assessment of SOFC and PEMFC concepts. In: Proceedings of 24th international congress of aeronautical sciences; 2004.
31. Staffell I, Scamman D, Velazquez Abad A, Balcombe P, Dodds PE, Ekins P, Shah N, Ward KR. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy Environ Sci* 2019.
32. DOE funds to deploy fuel cells for baggage vehicles at airports. *Fuel Cells Bull.* vol, no. 5; 2012. p. 3–4.

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

33. McConnell VP. Fuel cells in forklifts extend commercial reach. Fuel Cells Bull 2010;2010(9):12–9. 33. 44. Fuel cell forklift from German partnership. Fuel Cells Bull. vol, no. 12; 2003. p. 9.
34. Plug Power, FedEx project rolls out fuel cell airport tractors. Fuel Cells Bull. vol, no. 5; 2015. p. 2–3.
35. Toyota, Hino deliver fuel cell bus for Haneda airport route in Tokyo. Fuel Cells Bull., vol, no. 1; 2011, p. 3.
36. US Hybrid, BYD to develop fuel cell bus for Honolulu Airport. Fuel Cells Bull. vol, no. 6; 2018. p. 2.
37. Belmonte N, Staulo S, Fiorot S, Luetto C, Rizzi P, Baricco M. Fuel cell powered octocopter for inspection of mobile cranes: design, cost analysis and environmental impacts. Appl Energy 2018;215:556–65.
38. Fuel cell and hybrid power systems offer compelling value for UAVs whose missions demand greater runtime than batteries can support. [Online]. Available: <http://www.ballard.com/markets/uav>. [Accessed 20. Oct 2018].
39. AeroVironment flies world's first hydrogen powered plane. Fuel Cells Bull. vol, no. 9; 2005. p. 2–3.
40. Bradley TH, Moffitt BA, Mavris DN, Parekh DE. Development and experimental characterization of a fuel cell powered aircraft. J Power Sources 2007;171(2):793–801.
41. Gong A, Verstraete D. Fuel cell propulsion in small fixed-wing unmanned aerial vehicles: current status and research needs. Int J Hydrog Energy 2017;42(33):21311–33.
42. Kim T, Kwon S. Design and development of a fuel cell-powered small unmanned aircraft. Int J Hydrog Energy 2012;37(1):615–22
43. 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].
44. Molkov, V (2012). Fundamentals of hydrogen safety engineering, Part I and Part II. Available from: www.bookboon.com, free download e-book.
45. CEP, Clean Energy Partnership, 2014. Available from: <http://www.cleanenergypartnership.de/tech/site.php?l=en> [accessed on 01.05.14].
46. Saffers, J-B and Molkov, V (2014). Hydrogen safety engineering framework and elementary design safety tools. International Journal of Hydrogen Energy, 39 (11). pp. 6268-6285.
47. BRHS, Biennial Report on Hydrogen Safety (2009). The European network of excellence “Safety of hydrogen as an energy carrier” (NoE HySafe). Available from: www.hysafe.org [accessed on 06.11.20].

Cours 1 : Introduction à la sécurité de l'hydrogène destinée au personnel de secours

48. BSI (2001) British standard BS7974:2001 “Application of fire safety engineering to the design of buildings - Code of Practice”. Published Document PD 7974–0:2002 (2002) Application of fire safety engineering principles to the design of buildings – Part 0: Guide to design framework and fire safety engineering procedures, British Standard Institution.
49. V. Molkov and M. Bragin, High-Pressure Hydrogen Leak Through a Narrow Channel, Nonequilibrium Phenomena: Plasma, Combustion, Atmosphere, (2009), 332–338.
50. V. Molkov and J.-B. Saffers, Hydrogen Jet Flames, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 38, no. 19, (2013) 8141–8158.
51. V. Molkov, V. Shentsov, and J. Quintiere, Passive Ventilation of a Sustained Gaseous Release in an Enclosure With One Vent, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 39, no. 15, (2014) 8158–8168.
52. S. Brennan and V. Molkov, Safety Assessment of Unignited Hydrogen Discharge From Onboard Storage in Garages With Low Levels of Natural Ventilation, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 38, (2013) 8159–8166.
53. D. Makarov, V. Shentsov, M. Kuznetsov, and V. Molkov, Pressure Peaking Phenomenon: Model Validation Against Unignited Release and Jet Fire Experiments, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 43, no. 19, (2018) 9454–9469.
54. V. Molkov and M. Bragin, Hydrogen–Air Deflagrations: Vent Sizing Correlation For Low-Strength Equipment and Buildings, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 40, no. 2, (2015) 1256–1266.
55. D. Makarov, P. Hooker, M. Kuznetsov, and V. Molkov, Deflagrations of Localised Homogeneous and Inhomogeneous Hydrogen-Air Mixtures in Enclosures, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 43, (2018) 9848–9869.
56. V. Molkov and S. Kashkarov, Blast Wave From a High-Pressure Gas Tank Rupture in a Fire: Stand-Alone and Under-Vehicle Hydrogen Tanks, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 40, no. 36, (2015) 12581–12603.
57. M. Dadashzadeh, S. Kashkarov, D. Makarov, and V. Molkov, “Socio-Economic Analysis and Quantitative Risk Assessment Methodology for Safety Design of Onboard Storage Systems, in International Conference on Hydrogen Safety, Hamburg, Germany, (2017) vol. 184.
58. Barthelemy H, Weber M, Barbier F. Hydrogen storage: recent improvements and industrial perspectives. Int J Hydrogen Energy (2017) 42:7254-7262.
59. 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]
60. Harris, AP, Marchi CWS. (2012). Investigation of the hydrogen release incident at the AC transit Emeryville facility (Revised). Sandia report. SAND2012-8642.