



## PROJETS PILOTES H2 – ACE NOUVELLE CALEDONIE

---

# PRESENTATION GENERALE ÉTAT DE L'ART UTILISATION DE L'HYDROGENE A BORD DES NAVIRES

---

### MARSEILLE

68, Rue Sainte  
13001 MARSEILLE - FRANCE  
Tel: +33 4 91 33 08 07

### NANTES

1 Allée Baco  
44000 NANTES – FRANCE  
Tel: +33 2 51 86 49 49

[mauric@mauric.com](mailto:mauric@mauric.com) – [www.mauric.com](http://www.mauric.com)

© Tous droits réservés. Ce document dans son contenu et dans sa forme est la propriété de MAURIC. Toute utilisation, reproduction, modification, communication ou représentation intégrale ou partielle du présent document qui n'a pas été préalablement autorisée par écrit par MAURIC est formellement interdite. Une telle utilisation, reproduction, modification, communication ou représentation non autorisée, par quelque moyen que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par la loi aux plans pénal et civil et, d'une manière générale, une atteinte aux droits de MAURIC.

© All rights reserved. Both the content and form of this document are the property of MAURIC. It is formally prohibited to use, copy, modify, disclose or perform all or part of this document without obtaining MAURIC' prior written authorization. Any such unauthorized use, copying, modification, disclosure or performance by any means whatsoever shall constitute infringement punishable by criminal or civil law and more generally, a breach of MAURIC' rights.

Suivi des évolutions / Record of revisions

Indice /Issue	Date	Description / Modification	Auteurs / Authors	Vérificateurs / Approvals
A	02/03/2022	First issue/Première diffusion	AC	PR / VS

## TABLE DES MATIERES / TABLE OF CONTENTS

<b>1</b>	<b>RÉFÉRENCES</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>OBJET/OBJECT</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>L'HYDROGÈNE – QUELQUES DONNÉES</b>	<b>5</b>
3.1	Données physico-chimiques de l'hydrogène	5
3.2	Risques principaux de l'hydrogène	5
3.2.1	Caractère inflammable et explosif de l'hydrogène :	5
3.2.2	Risque principal : la fuite	6
3.2.3	Observations	6
<b>4</b>	<b>RÉGLEMENTATIONS MARITIMES SUR L'HYDROGÈNE</b>	<b>6</b>
4.1	Affaires Maritimes	6
4.2	Sociétés de classification	6
4.3	Conclusion sur les réglementations	7
<b>5</b>	<b>SOLUTIONS DE STOCKAGE H2</b>	<b>8</b>
5.1	Différentes techniques de stockage	8
5.2	Stockage de l'hydrogène sous pression	8
5.2.1	Bouteilles H2	8
5.2.2	Bundles	9
5.2.3	Conteneurs	10
5.2.4	Solutions d'avitaillement en hydrogène	10
<b>6</b>	<b>ÉQUIPEMENTS H2 DE PRODUCTION DE PUISSANCE</b>	<b>12</b>
6.1	Piles à combustible (PAC)	12
6.1.1	SOFC – Solid Oxyde Fuel Cell :	12
6.1.2	PEMFC – Proton exchange membrane :	12
6.1.3	Durée de vie	14
6.2	Moteurs H2 / Dual Fuel	14
6.3	Conclusion sur les équipements de conversion d'énergie	15
<b>7</b>	<b>INTÉGRATION À BORD DU SYSTÈME PAC H2</b>	<b>15</b>
7.1	Réglementation	15
7.1.1	Stockage d'hydrogène comprimé	15
7.1.2	Canalisations	16
7.1.3	Piles à combustibles	16
7.1.4	Zones dangereuses	16
7.2	Synoptique type	17
7.3	Batteries	17
<b>8</b>	<b>ÉTUDE DE RISQUES</b>	<b>18</b>
<b>9</b>	<b>ANNEXES</b>	<b>21</b>
9.1	Annexe 1 – Fiche Technique AFHYPAC – Inflammabilité et explosivité de l'hydrogène – Rev. Mai 2020.	21
9.2	Annexe 2 - Principe de fonctionnement d'une pile à combustible PEMFC	27
9.3	Annexe 3 – BV NR547 – Extrait – Section 5 §1.3 Area classification	28

## 1 REFERENCES

---

- [R1] Affaires Maritime, déc. 2021. Guide de bonnes pratiques pour l’approbation et la certification des navires utilisant l’hydrogène comme combustible.
- [R2] INERIS, 15/03/2016. Étude comparative des réglementations, guides et normes concernant les électrolyseurs et le stockage d’hydrogène.
- [R3] Bureau Veritas, Janv. 2022. Note Rule 547 – Ships using Fuel Cells.
- [R4] Bureau Veritas, Janv. 2020. Note Rule 547 – Gas Fuelled Ships – Part A Only.
- [R5] IMO, 24 Juin 2013. Guideline for the approval of alternatives and equivalent as provided for in various IMO instruments.

## 2 OBJET/OBJECT

---

De par sa nature ; la Nouvelle-Calédonie est un territoire tourné vers la mer. Les transports inter-iles, les transports urbains et péri-urbains, l’export des minerais et la pêche font alors appel au maillage maritime local et aux navires qui l’exploitent. Aujourd’hui la Nouvelle-Calédonie est également en pleine transition énergétique et cherche autant que possible à recourir aux énergies renouvelables et à diminuer ses émissions de gaz à effet de serre. C’est déjà le cas pour 100% des besoins domestiques.

L’hydrogène sur le territoire Néo-Calédonien est une réelle possibilité de contribuer au schéma pour la transition énergétique (STENC). L’H<sub>2</sub> est à la fois une énergie simple à produire et environnementalement saine, qui ne rejette aucun gaz à effet de serre lors de sa combustion par l’oxygène. Il est alors totalement envisageable d’imaginer l’hydrogène comme combustible de navires ou à l’origine de la fourniture d’électricité à bord. Sa production peut être basée sur des énergies renouvelables (« hydrogène vert »). Il peut aussi également être un sous-produit de production industrielle (hydrogène fatal) ; aujourd’hui peu ou mal valorisé, le développement de mobilités recourant à l’hydrogène permettrait d’exploiter ce type de source d’hydrogène.

C’est à cette fin que l’ACE définit des projets pilotes du monde maritime calédonien. Ces projets visent à prouver la maturité technique des solutions hydrogène et mener les réflexions futures. L’objectif dans ce secteur est encore plus large car l’enjeu repose également sur la constitution d’une stratégie globale H<sub>2</sub> au niveau de la Nouvelle-Calédonie. Dans le sillage des projets pilotes il en effet nécessaire de développer l’infrastructure de production d’H<sub>2</sub>, de son stockage et finalement de sa distribution.

En prouvant que l’H<sub>2</sub> convient à tous les secteurs, pour des utilisation diverses et variées, il s’agit de positionner la Nouvelle-Calédonie en pionnière et vitrine pour des applications H<sub>2</sub> à un niveau mondial.

Ce document a pour objectif de présenter de façon générale l’état de l’art actuel de l’utilisation de l’hydrogène comme carburant à bord des navires, en abordant les domaines de la réglementation maritime et en présentant les briques technologiques actuellement disponibles ainsi que des éléments de sécurité et d’intégration à bord.

### 3 L'HYDROGENE – QUELQUES DONNEES

---

#### 3.1 Données physico-chimiques de l'hydrogène

L'hydrogène, rare sous forme monoatomique (H) peut être isolé à l'état moléculaire (H<sub>2</sub>).

C'est le plus léger des gaz : à volume égal, 14 fois plus léger que l'air à pression atmosphérique). Il est incolore et inodore, insoluble dans l'eau.

La combustion de l'hydrogène avec l'oxygène produit de l'eau :  $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O + \text{chaleur}$

Une grande énergie est libérée pendant l'oxydation de l'hydrogène ::

- H<sub>2</sub> : 33,3 kWh/kg
- Gazole : 12 kWh/kg

Toutefois, l'hydrogène se caractérise par une faible densité :

- 1 kg d'hydrogène gazeux = ~11 m<sup>3</sup> à pression atmosphérique et température ambiante
- 1 kg d'essence = ~1,2.10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>

L'hydrogène est stocké en réservoirs sous format gazeux ou réservoirs cryogéniques à l'état liquide (-253°C). La solution sous forme gazeuse est actuellement la plus disponible à ce jour pour le domaine maritime.

Toutefois, les volumes à intégrer pour le stockage sous format gazeux (sous pression) restent importants :

- 1 kg d'hydrogène gazeux à 350b = ~40.10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>
- 1 kg d'hydrogène gazeux à 700b = ~23.10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>

Les contraintes exercées sur le contenant imposent l'utilisation de cylindres de type IV (renforcés), et donc un poids embarqué plus important que pour les hydrocarbures :

- 350bars : 13kg de poids de réservoir par kg d'H<sub>2</sub> stocké
- 500bars : 17kg de poids de réservoir par kg d'H<sub>2</sub> stocké

#### 3.2 Risques principaux de l'hydrogène

Tout comme d'autres gaz combustibles ou sources d'énergie, la manipulation de l'hydrogène comporte des risques, en particulier d'inflammation et d'explosion. Il présente certaines caractéristiques physico-chimiques qui, par plusieurs aspects, facilitent ou complexifient la maîtrise de ces risques par rapport à d'autres gaz et liquides :

##### 3.2.1 Caractère inflammable et explosif de l'hydrogène :

- Domaine d'inflammabilité dans l'air : 4 à 75% en volume (contre 5 à 15 % pour le méthane).
- Température d'auto-inflammation dans l'air : 585°C.
- Energie minimal d'inflammation : 20 μJ (équivalent à une décharge électrostatique humaine) contre 300 μJ pour le méthane.
- Combustion rapide, favorisant le phénomène de déflagration.
- Flamme peu visible et peu radiative.

- Une probabilité d'explosion à l'air libre plus faible compte tenu d'une forte diffusivité qui réduit le risque de formation d'un nuage explosif en milieu non confiné.

### 3.2.2 Risque principal : la fuite

La molécule de dihydrogène, de petite taille et de faible viscosité, a une propension à fuir plus importante. Toutefois :

- Si fuite à faible débit en milieu non confiné : dissipation dans l'air
- Si fuite fort débit et/ou milieu confiné : accumulation = danger

La mise en place d'un système d'évent et d'une ventilation efficace permet de disperser les fuites hors de l'espace confiné et ainsi d'en maîtriser le risque.

### 3.2.3 Observations

Ces caractéristiques sont connues et maîtrisées en milieux industriels, qui emploient depuis des années de l'hydrogène en grandes quantités sur certains sites, comme les raffineries ou les usines d'ammoniac.

Le cadre réglementaire historique actuel, qui encadre ces risques, est adapté à cet emploi traditionnel de l'hydrogène dans l'industrie. Il en découle également un retour d'expérience et un savoir-faire industriel et technique sur la manipulation de ce gaz.

Une note réalisée par l'AFHYPAC (Association française pour l'hydrogène et les piles à combustibles) sur la dangerosité de l'hydrogène est jointe en Annexe 1 de ce document.

Les nouveaux usages de l'hydrogène comme vecteur énergétique, compte tenu de contextes multiples (bâtiments, véhicules, ports et aéroports, entrepôts, etc.) et de quantités mises en œuvre différentes, changent la nature des risques et leur encadrement. L'utilisation des systèmes hydrogène sur les navires est parfaitement réalisable dans la mesure où les risques inhérents à ce combustible sont connus et pondérés par des équipements de sécurité et d'intégration.

## 4 REGLEMENTATIONS MARITIMES SUR L'HYDROGENE

---

### 4.1 Affaires Maritimes

Les Affaires Maritimes française ont édité en décembre 2021 le Guide de bonnes pratiques pour l'approbation et la certification des navires utilisant l'hydrogène comme combustible.

Ce document s'applique aux navires utilisant l'hydrogène comme combustible pour la propulsion ou la production d'énergie électrique du bord ([R1]).

Il s'appuie sur les exigences du Code IGF applicables à l'hydrogène, et se décline en 2 parties :

- Partie A : Exigences générales en termes d'objectifs de sécurité, de contrôle, de conformité aux règles et normes, de fiabilité, etc.
- Partie B : Phases du processus d'approbation du projet et exigences de l'analyse des risques.

### 4.2 Sociétés de classification

Les principales sociétés de classification ont travaillé sur la thématique de l'hydrogène comme carburant marin et ont édité des guides et notes réglementaires traitant de l'installation de ces systèmes à bord des navires.

Le tableau 1 présente l'état des publications pour certaines des plus importantes sociétés de classification :

Société de classification		Document	Publication
BV	Bureau Veritas	NR547 Ships Using Fuel Cell	Janvier 2022
DNV GL	DNV GL	Handbook for hydrogen-fuelled vessels-1 <sup>st</sup> ed.	Juin 2021
LR	Lloyds Register	Rules and Regulations for the Classification of Naval Ships January 2022. Part 5. Chap. 26	Janvier 2022
ABS	American Bureau of Shipping	Guide for Fuel Cell Power Systems For Marine and Offshore Applications	November 2019

Tableau 1- Publications des sociétés de classifications pour l'hydrogène - carburant marin

Mauric a choisi de se rapprocher du Bureau Veritas pour la présente étude.

En plus des règlements propres à chaque navire, il conviendra de suivre les règles suivantes pour l'installation d'équipements de production d'énergie fonctionnant à l'hydrogène :

- **BV NR547 : Ship Using Fuel Cells**

Cette Note Rule concerne plusieurs carburant pouvant être utilisés dans les piles à combustible : ammoniac, méthanol/éthanol, gaz naturel, hydrogène, etc. Elle détaille l'étude de risque qui devra être menée, et indique les obligations à respecter en termes de matériaux utilisés, general arrangement, installations des PACs, systèmes électriques, incendie, etc.

- **BV NR529 : Gas Fuelled ships- Partie A**

La NR547 renvoie à la NR529 pour les contraintes à respecter concernant le stockage, la transformation et la distribution du combustible en dehors du local PAC, lorsque le combustible utilisé est de l'hydrogène.

### 4.3 Conclusion sur les réglementations

Les autorités réglementaires sont donc encore loin d'être matures sur ces sujets innovants de l'utilisation de l'hydrogène à bord des navires. Des principes généraux ont été définis pour l'utilisation de combustible à faible point d'éclair mais en dehors du gaz naturel, peu de prescriptions factuelles sont établies et peuvent être utilisées de manière certaines par les chantiers navals et bureaux d'études pour concevoir le navire sans analyse approfondie des risques. Une approche par analyse de risque (voir §8) est donc indispensable et doit être menée de concert avec les autorités de pavillon et de classification.

## 5 SOLUTIONS DE STOCKAGE H2

### 5.1 Différentes techniques de stockage

Plusieurs solutions pour le transport et le stockage de l'hydrogène existant actuellement, à des degrés différents de maturité :

- Stockage solide : à température et pression ambiantes par absorption par alliages métalliques pour former des hydrures métalliques. Cette solution n'est pas suffisamment mature actuellement pour un usage dans le domaine maritime.
- Stockage liquide sous forme cryogénique : l'hydrogène refroidit à  $-253^{\circ}\text{C}$  permet un stockage à pression atmosphérique. Les contraintes techniques et de sécurité liées à ces basses températures ne permettent pas pour le moment d'envisager cette solution dans le domaine maritime.
- Stockage liquide sous pression et température proches des valeurs ambiantes – procédé LOHC ( Liquid Organic Hydrogen Carrier) : cette solution est encore au stade de développement.
- Stockage sous pression : la mise sous pression de l'hydrogène permet d'augmenter sa densité et se fait à des pressions de 50 à 700 bars actuellement. Cette solution est actuellement disponible pour des applications dans le domaine maritime.

### 5.2 Stockage de l'hydrogène sous pression

#### 5.2.1 Bouteilles H2

Les pressions de stockage d'hydrogène envisagées pour le domaine maritime sont de 350 à 700bars. Les bouteilles les plus utilisées sont des cylindres de type 4 : liner en polymère entouré et renforcé par des matériaux composites en fibre de verre ou de carbone.



Figure 2 - Vue en coupe cylindre hydrogène type



Figure 1 - Exemple de rack de stockage



Les bouteilles sont installées dans des racks, à l’horizontale ou à la verticale. Placées en extérieur, ce rack doit être ceint d’une enveloppe protectrice contre les chocs. Il doit également être pourvu d’une clarinette de raccordement au réseau du bord.

Le tableau 2 détaille les données des cylindres d’hydrogène de la société Hexagon :

	350b	500b	700b
Poids bouteille	101 kg	180 kg	188 kg
Capacité H2	7,5 kg	10,6 kg	9,8 kg
Poids total	108,5 kg	190,6 kg	197,8 kg
Kg bouteille/1kg H2	13,5 kg <sub>bouteille</sub> /kg <sub>H2</sub>	17 kg <sub>bouteille</sub> /kg <sub>H2</sub>	19,2 kg <sub>bouteille</sub> /kg <sub>H2</sub>
Volume bouteille	312 L	333 L	244 L
Longueur	3,19 m	2,357 m	2,154 m
Diamètre	430 mm	520 mm	530 mm

Tableau 2- Solutions de stockage en cylindres - Données Hexagon Lincoln

De nombreuses solutions applicables au domaine maritime sont actuellement disponibles aux pressions de 350 et 500 bars.

### 5.2.2 Bundles

Le bundle est un rack de bouteilles de taille normalisée par les entreprises qui les proposent. Il n’existe pas actuellement de modèle certifié pour des applications maritimes, mais ils ont retenu notre attention pour les raisons suivantes :

- Racks fabriqués en série, avec clarinette de raccordement intégrée
- Plus modulables que la solution conteneurs
- Certaines entreprises ont déjà une certification maritime pour leur solution conteneur.



Hydrogen Bundle 1 800L @500bar

Figure 3 - Exemple de solution bundle - Crédits Mahytec Nexeya France

Le tableau 3 présente différentes solutions de stockage d’hydrogène en bundles par l’entreprise Mahytec-Nexeya France.

Pression 500b	6*300L	9*300L	20*300L
Masse d'hydrogène stockable	57 kg	85,6 kg	194 kg
Masse totale bundle	~1 620 kg	~2 430 kg	~5 200 kg
Longueur	3,30m	3,30 m	3,30 m
Largeur	1,80 m	1,60 m	2,40 m
Hauteur	1,70 m	1,75 m	2,70 m

Tableau 3 - Solution de stockage cylindres hydrogène en bundles - Données Mahytec Nexeya France

Pour un stockage en pontée, cette solution devra garantir la protection des bouteilles contre les chocs.

### 5.2.3 Conteneurs

Le stockage d'hydrogène en conteneurs permet une intégration complète dans une chaîne logistique normalisée. Aujourd'hui, on trouve des solutions certifiées pour un usage maritime en version 10' et 20, jusqu'à 500 bars. Les conteneurs sont munis de capteurs d'hydrogène et de vannes PRD (Pressure Relieving Device). La clarinette de raccordement au réseau du bord est intégrée, mais pas le système de détente du gaz. Ils sont peu adaptés pour des petits navires par leur encombrement et leur poids plus important.

Le tableau 4 présente différentes solutions de stockage en conteneurs, modèle Xstore de l'entreprise Hexagon :

Fabricant - Modèle	Hexagon – Xstore 10ft 250bar	Hexagon – Xstore 10ft 300bar	Hexagon – Xstore 20ft 500bar
Masse d'hydrogène stockable (kg)	150 kg	175 kg	565 kg
Masse totale (kg)	4 000 kg	4 870 kg	16 225 kg
Pression de stockage (bar)	250b	300b	500b
Longueur (m)	3,05 m	3,05 m	6,06 m
Largeur (m)	2,44 m	2,44 m	2,44 m
Hauteur (m)	2,74 m	2,74 m	2,74 m

Tableau 4 - Solution de stockage hydrogène Xstore - Données Xexagon Lincoln

### 5.2.4 Solutions d'avitaillement en hydrogène

Deux possibilités existent pour l'avitaillement en hydrogène des navires :

#### 5.2.4.1 Transfert direct du gaz sous pressions dans les bouteilles du bord

Le débit actuel de transfert est de maximum 60g par seconde (limitation de la montée en température du système) pour une pression amont de 700b. Une différence de pression de l'ordre de plusieurs Mpa doit exister entre l'amont et

l'aval pour permettre des débits de transfert conséquents. Pour maintenir cette différence de pression, l'installation terrestre peut être composée :

- D'un compresseur,
- D'une réserve en surpression (camion d'avitaillement ou cuve tampon).

L'association de ces 2 équipements permet d'optimiser l'opération d'avitaillement : l'hydrogène de la réserve est maintenu en permanence à une pression supérieure à la pression de remplissage grâce à un compresseur commandé par un automatisme régulateur de pression.

Il est nécessaire d'inerté la ligne d'avitaillement du bord.

#### 5.2.4.2 Échange de réservoir

Il est également possible de procéder à l'échange du(des) réservoir(s) vide par un(des) réservoir(s) préalablement rempli à terre. Cette solution nécessite d'inerté la ligne située entre les réservoirs et la PAC et d'établir une procédure tenant compte des problématiques de maintien d'étanchéité de la ligne avec des connexions démontables (opération à intégrer dans les études de risque). Elle impose également des manutentions de réservoirs régulières, une certification spécifique de ces réservoirs pour un transport routier (racks renforcés), etc. Les dispositions de connexion/déconnexion doivent également faire l'objet de dispositions spécifiques pour être mise en œuvre régulièrement et en toute sécurité.

Enfin l'équipage doit être formé à la mise en œuvre de ces opérations de connexion et reconnexion.

#### 5.2.4.3 Comparaison des solutions d'avitaillement en hydrogène

Le tableau 5 ci-dessous présente une comparaison des différentes solutions d'avitaillement en hydrogène :

	Avitaillement par camion et transfert par différence de pression	Avitaillement par compresseur et cuve tampon	Avitaillement par échange de réservoirs
Description	Plusieurs camions avec tubes trailers composite nécessaires (plus gros camions disponibles : Linde-500b*1100kg). Possibilité d'avoir une ligne de remplissage pour chaque réservoir à bord afin de limiter le temps d'avitaillement.	Deux cuves tampon sont sur le quai (une en amont, une en aval), reliées à un compresseur puis au navire.	Les réservoirs préalablement remplis sont amenés sur le quai par camion et grutés à bord.
Avantages	Moindre coût d'installation.	Autonomie du navire pour effectuer son avitaillement (pas de créneau nécessaire pour le transport).	Temps d'avitaillement plus court (ne pas négliger le temps lié aux procédures de manutention et de déconnexion/reconnexion au réseau du bord).
Inconvénients	Temps d'avitaillement le plus long. La pression de stockage à bord doit être <700b (pression maximale des camions).	Coût le plus élevé (à titre d'exemple, une station voiture délivrant 80kg/jour coûte 1,6M€).	Présente le plus de risques (déconnexion/reconnexion au réseau du bord par des connexions spécifiques). Besoin d'un moyen de manutention pour le grutage des réservoirs.

Tableau 5 - Comparaison des différents modes d'avitaillement des navires en hydrogène

## 6 ÉQUIPEMENTS H2 DE PRODUCTION DE PUISSANCE

---

### 6.1 Piles à combustible (PAC)

Plusieurs types de pile à combustible sont aujourd'hui disponibles sur le marché ou en développement. L'Annexe 1 présente le principe de fonctionnement d'une pile à combustible à membrane échangeuse de proton (PEMFC).

Pour les applications marines à hydrogène, on relève principalement les technologies suivantes :

#### 6.1.1 SOFC – Solid Oxyde Fuel Cell :

Ces PAC sont utilisées principalement dans les applications stationnaires et actuellement en développement pour les applications maritimes. La réglementation se prépare à prendre en compte ce type de PAC. Elles fonctionnent à des températures comprises entre 400°C et 1000°C et tolèrent des combustibles plus variés et moins purs que la pile PEMFC. Le rendement de ces piles se situe actuellement entre 50 et 60%.

Elles sont commercialisées par Bosch, Covion (Ex Wartsila), Staxera (Projet e4ships de Thyssenkrupp Marine Systems).

#### 6.1.2 PEMFC – Proton exchange membrane :

Ce sont les PAC les plus répandues dans les applications de transport fonctionnant à basse pression et basse température (200°C maxi). Le rendement de ces piles se situe aux alentours de 50%. Elles sont commercialisées notamment par des fournisseurs tels que SymbioFCCell, Ballard, Helion.

À l'heure actuelle la technologie PEMFC est plus avancée pour des applications marines (plusieurs modèles en cours de certification par des sociétés de classification, plusieurs navires ou bateaux équipés, retour d'expérience important dans des applications de mobilité) et le fonctionnement à basse température apporte des avantages indéniables en termes de sécurité malgré un rendement plus faible.

Au sein de la famille de pile à combustible à membrane échangeuses de proton (PEMFC), plusieurs types de piles existent :

- Les piles PEM dites basses pressions, fonctionnant à des pressions d'alimentation en air de l'ordre de quelques centaines de millibars avec un simple circulateur d'air.  
Cette technologie permet un fonctionnement très stable de la pile mais avec une réactivité aux variations de charge plus faible. Elle prolonge en revanche la durée de vie de la pile.
- Les piles PEM avec injection d'air forcée par compresseur ou turbocompresseur à des pressions de l'ordre de 1,5 à 2 bars.  
Cette technologie apporte une meilleure réactivité et un meilleur rendement à la pile. La durée de vie est moindre et cette technologie impose des auxiliaires plus conséquents et plus consommateurs d'énergie.
- Les piles HT-PEM (haute température), fonctionnant à des températures de l'ordre de 200°C.  
Elles disposent d'un meilleur rendement (50-60%) et sont moins sensibles aux impuretés de l'hydrogène, mais ont une densité énergétique plus faible et sont aujourd'hui moins répandues.

De façon générale, les différentes solutions de PAC PEMFC disponibles pour les applications maritimes présentent les caractéristiques suivantes :

- Certifiés pour le maritime : jusqu'à 2MW (Mise en série-parallèles de PAC).
- Rendement moyen : 50% (Moteur thermique : ~35%).

- Charge optimale : entre 50% et 85% de la puissance maximale.
- Qualité d'hydrogène requise en entrée : ISO14687 Grade D (>99,99%).
- Qualité de l'air requise en entrée : humidité <95%, filtre à air intégré.
- Fonctionnement à privilégier : fonctionnement à charge constante, limiter arrêts/démarrages.
  - PAC accompagnée d'un set de batteries.
- Durée de vie : de 4000h à 20 000h suivant les fournisseurs (la différence se trouvant principalement dans le retour d'expérience de ces fournisseurs, certaines mises sur le marché étant très récentes).
- Sortie jusqu'à 750VDC par mise en série de PAC.



Figure 4 - 70kW  
REXH2 V2  
- Crédits EODEv



Figure 5 - 50kW  
PM400  
- Crédits Proton  
Motor



Figure 6 - 200kW  
FCWave  
- Crédits Ballard



Figure 7 - 200kW  
Marine System 200  
- Crédits Power  
Cellusion

Le tableau 6 présente les principales données des piles à combustible considérées pour ces projets :

Fabricant - Modèle	EODEv – REXH2 V2	Proton Motor - PM400	Ballard – FCWave	Power Cellusion – Marine System 200
Puissance maximale	70 kW	50 kW	200 kW	200 kW
Masse	630 kg	91 kg*	875 kg	1070 kg
Longueur	1,60 m	1,05m	1,22 m	0,73 m
Largeur	1,00 m	0,44m	0,74 m	0,90 m
Hauteur	1,00 m	0,28 m	2,20 m	2,20 m
Rendement max	-	47-67%	56	54
Consommation à la puissance nominale et pour une pile en fin de vie**	65,7 g H <sub>2</sub> /KWh <sub>elec</sub>	-	65,3 g H <sub>2</sub> /KWh <sub>elec</sub>	66,0 g H <sub>2</sub> /KWh <sub>elec</sub>

\* Sans périphériques

\*\* Les consommations ont été harmonisées autant que possible à partir des données constructeur

Tableau 6 - Principales caractéristiques des PAC considérées à ce stade des projets

Les piles à combustible comprennent plusieurs modules mis en série pour atteindre la puissance et la tension de sortie requises. Les auxiliaires tels que système de filtration de l'air en entrée, système de contrôle interne et transformateur de tension de sortie sont intégrés dans l'enveloppe. La figure 8 présente les composants de la PAC PM400 Proton Motor. Les systèmes de récupération d'énergie et d'eau produite ne sont pas intégrés.

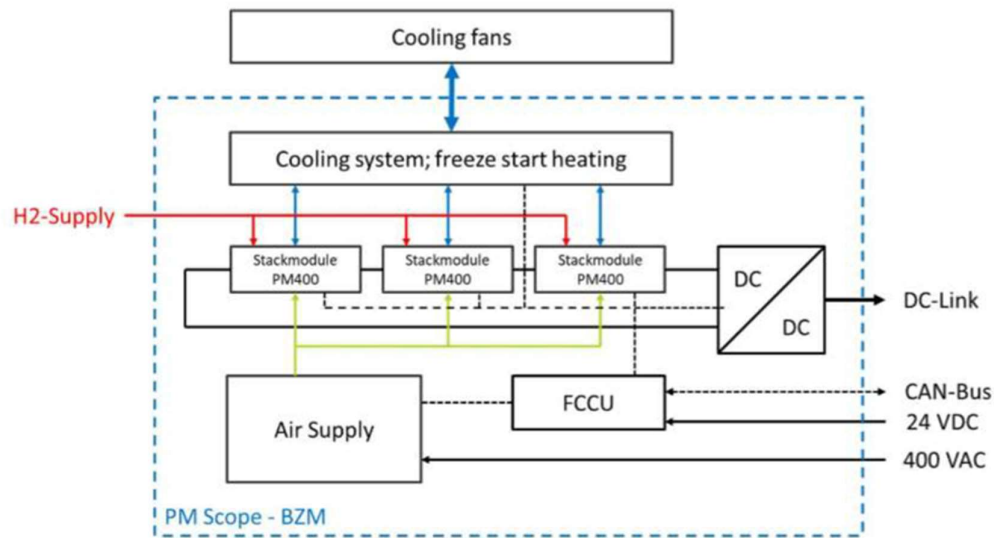


Figure 8 - Fuel Cell System (Multi Stack System) - Credits Proton Motor

### 6.1.3 Durée de vie

Sur une base de 4 jours de fonctionnement à 10h par jour et 52 semaines d'exploitation, la durée de vie garantie des piles à combustibles seraient de 4,8 années (pour une durée de vie moyenne de 10 000 heures de fonctionnement). La durée de vie pratique des piles sera probablement supérieure mais un renouvellement fréquent des stacks est à prévoir pour le navire.

Les piles peuvent être reconditionnées (renouvellement de la membrane et des électrodes), le cout OPEX du renouvellement est alors donné à environ 15% du prix CAPEX de la pile (valeur à confirmer pour des piles marinisées). Le coût CAPEX d'une pile est donné à environ 1000 €/kW (hors conversion de puissance et auxiliaires, valeur à confirmer pour des piles marinisées).

Il sera nécessaire de prévoir des dispositions à bord pour assurer un débarquement aisé des PAC lors de leur renouvellement (panneaux sur charnière, etc).

## 6.2 Moteurs H2 / Dual Fuel

Il existe aujourd'hui des moteurs à combustion interne spécifiquement adaptés pour la combustion de l'hydrogène soit en mode dual fuel (diesel 25% + hydrogène 75%) soit en mode 100% hydrogène.

Un seul fournisseur à ce jour a été identifié pour des applications maritimes, et uniquement sur des gammes de moteurs semi-rapides (puissances de 1000 à 2670 kW).

D'autres motoristes annoncent travailler sur le développement de moteurs rapides pour les rendre disponibles en certification maritime sous 2 ans.

## 6.3 Conclusion sur les équipements de conversion d'énergie

Le tableau 7 présente les avantages et inconvénients de ces 2 solutions de conversion d'énergie :

Technologie	Pile à combustible H2	Moteur à combustion interne dual fuel H2-gazole	Moteur 100% H2 (spark ignited)
<b>Maturité</b>	Nombreux Retours d'expérience dans des applications de mobilité, dont plusieurs en fluvial /maritime	Développement récent	Développement récent
<b>Risque marché</b>	Plusieurs fournisseurs sur le marché	Un seul fournisseur possible identifié à ce jour	Un seul fournisseur possible identifié à ce jour
<b>Complexité de l'installation</b>	Nécessite des convertisseurs + réseau électrique + moteurs électriques + transmission mécanique pour arriver à l'hélice.	Transmission mécanique exclusivement jusqu'à l'hélice	Transmission mécanique exclusivement jusqu'à l'hélice
<b>Taux d'utilisation d'hydrogène (&gt; Impact environnemental)</b>	100% H2	75% maxi	100% H2
<b>Rendement global</b>	Rendement de l'équipement équivalent Mais rendement de conversion défavorable	Rendement de l'équipement équivalent mais rendement de conversion plus favorable	Rendement de l'équipement équivalent mais rendement de conversion plus favorable
<b>Durée de vie</b>	Entre 4.000 et 20.000 heures	Attendue >50.000 heures	Attendue >50.000 heures
<b>Flexibilité carburant</b>	Non	Oui	Non
<b>Puissances disponibles</b>	De 50 kW à 2 MW certifié pour le domaine maritime	Disponible en version semi rapide uniquement aujourd'hui, à partir de 1 MW Disponibilité en plus faible puissance et approuvé Marine fin 2023 espérée courant 2024.	Disponible en version semi rapide uniquement aujourd'hui, à partir de 1 MW Disponibilité en plus faible puissance et approuvé Marine fin 2023 espérée courant 2024.
<b>Qualité hydrogène requise en entrée</b>	> 99,99%	Hydrogène moins pur autorisé	Hydrogène moins pur autorisé

Tableau 7 - Comparaison solutions Pile à combustible / Moteur Dual-fuel/100%H2

## 7 INTEGRATION A BORD DU SYSTEME PAC H2

### 7.1 Réglementation

Les différentes réglementations listées au paragraphe 4 précisent notamment les dispositions suivantes pour l'intégration de systèmes hydrogène à bord :

#### 7.1.1 Stockage d'hydrogène comprimé

Le stockage de carburant primaire doit être séparé du local PAC ([R3] Section 4 §2.1) et ne doit pas être placé dans un espace clos, sauf dispositions spéciales ([R4] Part A-1 §6.6.4).

Il doit être situé à une distance minimale de B/5, ou 11,5m du bordé de muraille et B/15, ou 2m, du bordé de fond du navire ([R4] Part A-1 §5.3), et en arrière de la cloison d'abordage pour les navires de charge.

Si placé à l'extérieur en pontée, son emplacement doit permettre une ventilation naturelle suffisante pour permettre la dispersion de gaz ([R4] Part A-1 §5.3.2).

Il doit être équipé d'une soupape de sécurité et d'un mât de dégazage vertical dont l'extrémité devra se trouver à un minimum de B/3 ou 6m au-dessus des zones de travail et de circulation, et à 10m des entrées et sorties d'air et des entrées vers les aménagements ([R4] Part A-1 §6.6.2).

Il doit être protégé contre les chocs mécaniques ([R3] Section 4 §2.1).

### 7.1.2 Canalisations

Les canalisations doivent être placée à un minimum de 800mm du bordé ([R4] Part A-1 §5.7) et être équipée d'un système d'inertage et de détection de fuite, ainsi que d'un système de ventilation de la double-peau ([R3] Section 4 §4.1, [R4] Part A-1 §5.7). Elles doivent être protégés contre les chocs mécaniques ([R3] Section 4 §2.1) et comporter le moins de raccords possible.

### 7.1.3 Piles à combustibles

Les piles à combustibles doivent se trouver dans un local dédié ([R3] Section 4 §3.1) de type ESD (Emergency Shut Down), avec un système de ventilation redondant ([R3] Section 4 §5.2).

Lorsque le système PAC sert de source d'énergie pour la propulsion ou des services essentiels, il conviendra d'installer plusieurs PAC dans différents locaux séparée et/ou d'intégrer à bord d'autres sources d'énergie ([R3] Section 5 §2.1).

Le local PAC doit être accessible directement depuis l'extérieur, sauf dispositions particulières ([R3] Section 4 §3.1). Son isolation incendie doit être de type A60.

### 7.1.4 Zones dangereuses

La définition des zones dangereuses d'un système PAC est présenté en Annexe 3, extrait du BV NR547 ([R3] Section 5 §1.3).

Le niveau de zonage ATEX de chaque espace sera déterminé par l'étude de risque (cf §8). Ces espaces comprennent :

- L'espace d'avitaillement
- Les espaces de raccordement et de transformation du combustible (détente)
- Le(s) local PAC
- Les tenants et aboutissants des systèmes de ventilations des différents espaces ainsi que les aboutissants des lignes d'évent.

À l'intérieur de ces zones dangereuses les équipements présentant un risque d'étincelle ou de source de chaleur importante doivent être certifiés (ATEX – Anti explosif). Ces équipements peuvent par exemple être : moteurs électriques, vérins de clapets, moteurs hydrauliques, vannes motorisées, etc.



## 7.2 Synoptique type

La figure 9 ci-dessous présente un synoptique type de système PAC H2 à bord d'un navire.

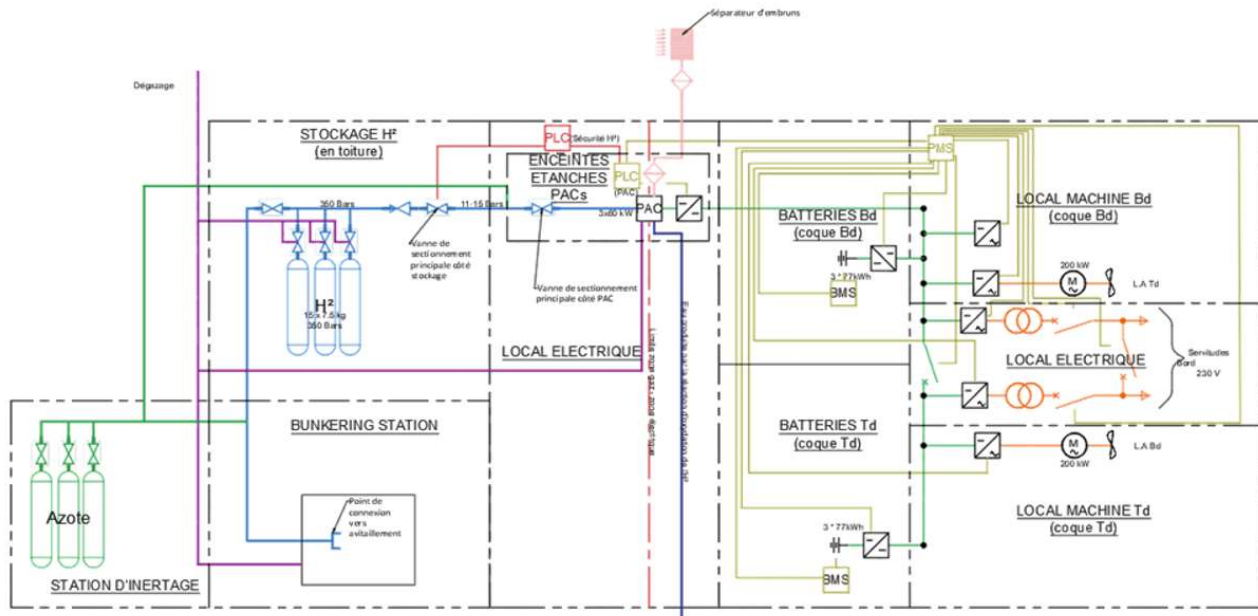


Figure 9 - Synoptique de propulsion – Exemple Navette Maritime Mont Dore - Nouméa

On notera :

- La possibilité de fonctionner avec un bus principal DC (Courant Continu) ou AC (Courant Alternatif) pour le raccordement des différentes sources au réseau électrique et l'alimentation des principaux consommateurs (propulsion).
- La séparation des locaux, ayant chacun leur système de ventilation, de contrôle et de mise en sécurité : local électrique, local PAC, local batteries, local machines de propulsion, station d'inertage.

Du point de vue de la sécurité, seront intégrés les équipements suivants (liste non exhaustive) :

- Vannes de sectionnements type PRD sortie de stockage / entrée PAC.
- Limiteurs de débit.
- Lignes d'évent local stockage / local PAC.
- Dispositifs de détection incendie par caméra thermique / Dispositif de lutte incendie type « déluge ».
- Ventilation adaptée local stockage / local PAC avec capteur catalytique pour détection H2.
- Système d'inertage des canalisation (azote).

## 7.3 Batteries

Comme nous l'avons vu, les piles à combustibles sont installées avec un jeu de batteries permettant de lisser l'appel de puissance du réseau et éviter les variations de charge des PAC.

La quantité d'énergie embarquée dépendra du profil opérationnel du navire et du niveau de redondance requise.

Ces batteries doivent être placées dans un local dédié, conformément à la réglementation. Un système de ventilation ou de climatisation sera nécessaire pour assurer leur bon fonctionnement et leur sécurité.

La durée de vie des batteries se situe en moyenne entre 4000 et 8000 cycles (à 80% de leur puissance).

On compte en moyenne un coût CAPEX pour les batteries marinisées de 700€/KwH.

De façon générale, on compte une moyenne de 10kg/kWh installé.

Le tableau 8 donne une idée de l'encombrement et de la masse embarquée des jeux de batteries marinisés de la marque Leclanché, ces données correspondant aux caractéristiques des batteries en sortie d'usine (début de vie) :

	21 kWh	42kWh	63 kWh	70 kWh
Masse	245 kg	435 kg	623 kg	686 kg
Longueur	0,62 m	0,62 m	0,62 m	0,62 m
Largeur	0,44 m	0,44 m	0,44 m	0,44 m
Hauteur	0,93 m	1,76 m	22,22 m	2,244 m
Wh/m2	80 Wh/m2	161 Wh/m2	240 Wh/m2	267 Wh/m2
Wh/kg	86 Wh/kg	97 Wh/kg	101 Wh/kg	102 Wh/kg

Tableau 8- Marine Battery Systems - Données Leclanché

## 8 ÉTUDE DE RISQUES

Conformément à la réglementation ([R1]), l'étude de risque doit être menée en concertation avec l'administration (État du pavillon et société de classification) dès le début du projet, au stade de la conception préliminaire, afin de fixer le processus de conception et d'approbation.

Ce processus est décrit dans la figure 9. C'est un processus itératif qui comprend 5 jalons ([R1]) :

1. mise au point d'une conception préliminaire ;
2. approbation de la conception préliminaire ;
3. mise au point de la conception définitive ;
4. mise à l'essai et analyse de la conception définitive ;et
5. approbation.

La réglementation impose la redondance du système afin de limiter la perte de puissance dans des valeurs acceptables. En cas de combustible unique, le circuit de distribution de ce combustible doit être redondant.

Les systèmes de sécurité doivent avoir des sources d'alimentation et d'information séparés afin de limiter les défaillances ayant des sources communes.

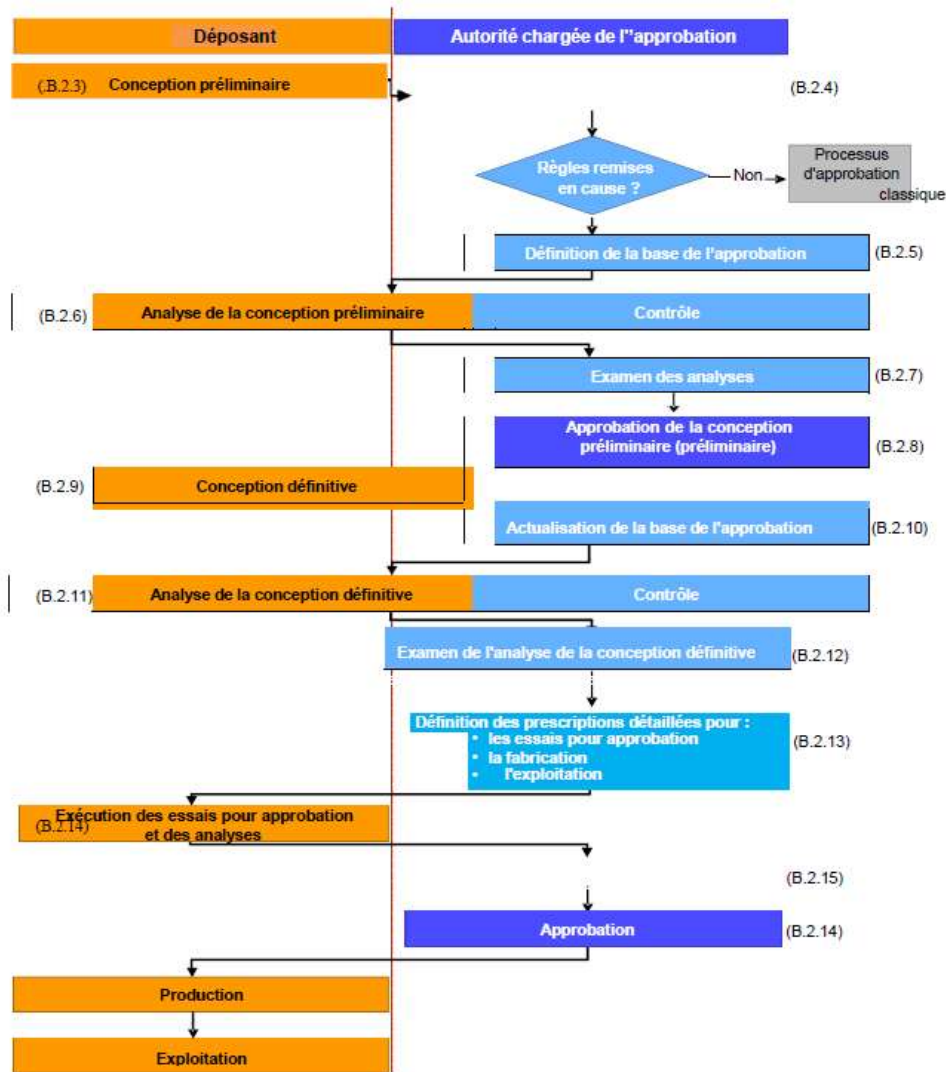


Figure 10 - Processus de conception et d'approbation - Affaires maritimes, [R1]

Selon la réglementation BV NR 547 ([R3]), et BV NR 529 ([R4]) l'étude de risque doit au minima comprendre :

- Une étude HAZID (Hazard Identification) pour l'espace PAC, la station d'avitaillement, les espaces de connexion et de préparation du carburant (détente), et les espaces vers lesquels les lignes de décharge et d'évent sont dirigées.  
Ces études peuvent mener à la nécessité d'une étude ATEX sur ces différents espaces et les espaces adjacents.
- Une étude HAZOP (Hazard and operability study) pour le système PAC lui-même,
- Une analyse AMDEC (analyse des modes de défaillance et de la criticité) si la PAC est utilisée comme source d'énergie pour des services essentiels. Elle permet d'apprécier pour chacun des facteurs de risques identifiés sa probabilité d'occurrence, son impact et son niveau de maîtrise.

Ces analyses sont conduites par une société spécialisée qui, à partir d'un dossier détaillé sur l'architecture du système, la définition des équipements et les modalités d'utilisation du système (liées à l'exploitation), va mener différentes études (dispersion des gaz, etc.) et conduire des séminaires d'analyse avec des spécialistes (Services d'incendie et de secours, fournisseurs d'équipements, autorités de pavillon et société de classification, etc.).

Elles couvriront notamment les thématiques suivantes :

- Circuit d'alimentation en gaz
- Système de confinement du gaz et ventilation associée.
- Système de détection du gaz
- Systèmes de contrôle et de mise en sécurité
- Système PAC
- Défaillance des différents systèmes
- Possibilités et conséquences de fuite
- Conséquences d'un black-out
- Facteur humain (procédures impliquant un opérateur)

À partir de cette analyse de risque, différentes dispositions techniques pourront ensuite être imposées par les autorités de pavillon et/ou la société de classification afin de garantir un niveau de sécurité satisfaisant au navire et *obtenir in fine* un permis de navigation pour le navire.

La figure 11 ci-dessous récapitule les intervenants et les phases du processus d'analyse ([R5]) :

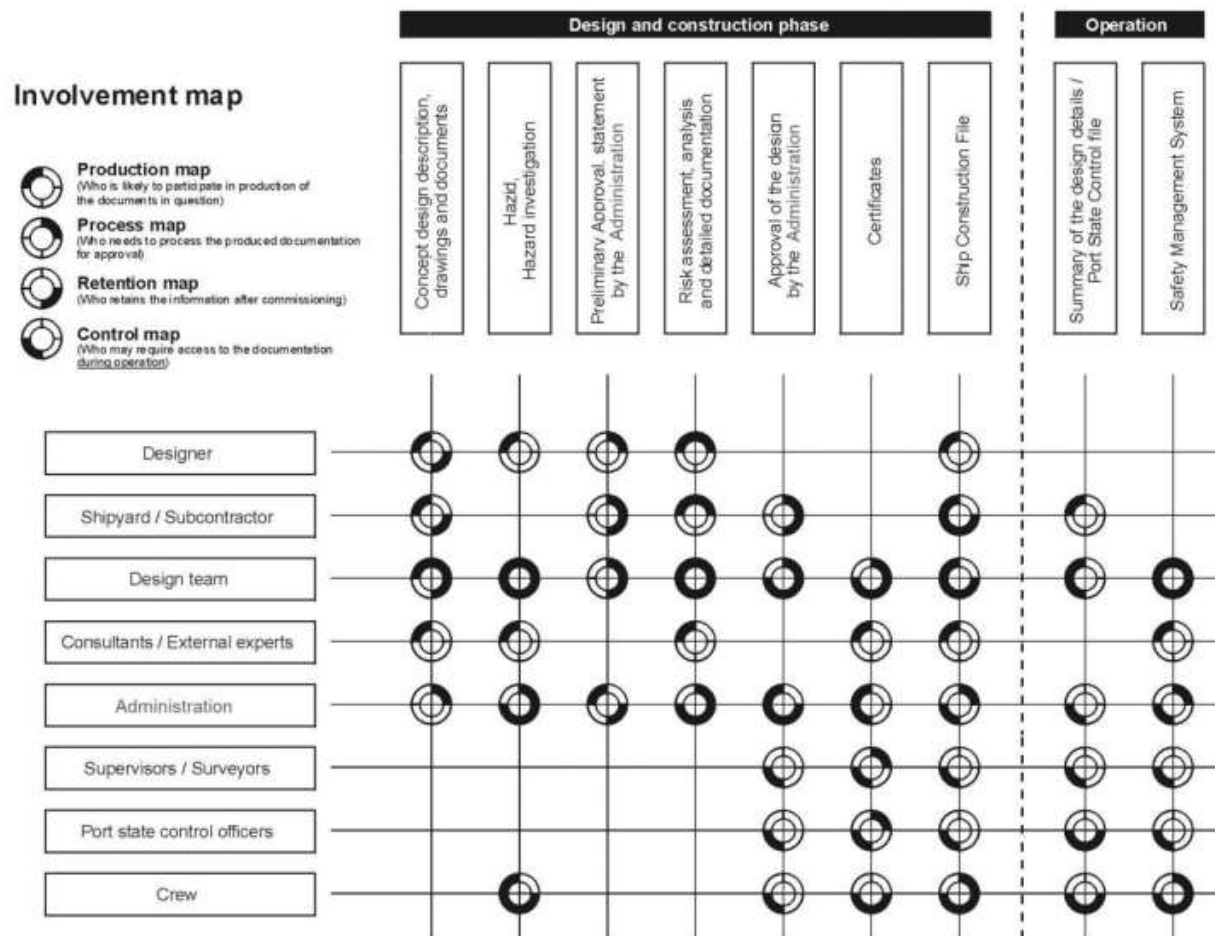


Figure 11 - Combined involvement map - Extrait IMO MSC/Circ.1455 - §3.1

## 9 ANNEXES

### 9.1 Annexe 1 – Fiche Technique AFHYPAC – Inflammabilité et explosivité de l'hydrogène – Rev. Mai 2020.



Association française  
pour l'hydrogène et  
les piles à combustible

*Mémento de l'Hydrogène*  
**FICHE 7.1**

#### INFLAMMABILITE ET EXPLOSIVITE DE L'HYDROGENE

##### Sommaire

1. Introduction
2. Combustion
3. Inflammabilité
4. Explosivité
5. Conclusion

#### 1. INTRODUCTION

Les remarquables propriétés de l'hydrogène en tant que combustible à la fois très énergétique et respectueux de l'environnement ne doivent en aucun cas minimiser la dangerosité qu'il présente comme cela est le cas pour tout combustible. Il est en effet dans certaines conditions inflammables voire explosif.

#### 2. COMBUSTION

La combustion est une réaction exothermique d'oxydoréduction entre un combustible et un comburant qui le plus souvent est l'oxygène de l'air.

Pour qu'il y ait combustion, trois conditions doivent être réalisées:

- La présence d'un carburant (hydrogène, propane, méthane...) dont la concentration est dans sa plage d'inflammabilité ;
- La présence d'un comburant (oxygène) en concentration supérieure à la concentration limite ;
- Une énergie d'inflammation qui dépasse l'énergie minimale d'inflammation (étincelle, point chaud ...).

Ces trois conditions sont symbolisées par le triangle du feu<sup>1</sup>.

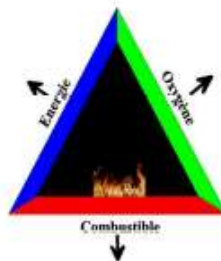


Figure 1 -Triangle du feu

<sup>1</sup> Source : <http://www.firemanbiker.ch/triangle.htm>. Longtemps le triangle du feu fut la base de la chimie du feu. Au début des années 1980, une quatrième partie fut identifiée et aujourd'hui, la chimie du feu est basée sur un tétraèdre comprenant l'oxygène, le carburant, la chaleur et les radicaux libres formés par oxydation du combustible sans lesquels aucune combustion avec flammes n'est possible, une situation qui n'est pas le cas avec le combustible hydrogène.

La combustion de l'hydrogène dans l'air donne lieu à une flamme quasi-invisible et très chaude d'une température de 2045°C (2318°K).  
La concentration de carburant dans le comburant est l'un des facteurs déterminants de la combustion, elle détermine les conditions d'inflammabilité.

### 3. INFLAMMABILITE

L'inflammabilité est la capacité d'un combustible à s'enflammer et à maintenir sa combustion.

#### Les limites d'inflammabilité

La plage de concentration gaz/air susceptible de produire un mélange combustible est limitée. Les concentrations au-dessous et au-dessus desquelles l'inflammation et la propagation de la flamme ne sont pas possibles sont appelées limites d'inflammabilité.

Lorsque le mélange est trop pauvre en combustible, l'inflammation ne se produit pas, le pourcentage de combustible est alors au-dessous de la Limite inférieure d'inflammabilité, LII. Au-dessus de ce seuil, le mélange combustible-comburant pourra brûler tant que l'on n'aura pas dépassé le taux maximum de combustible au-delà duquel le mélange devient trop pauvre en comburant. Ce deuxième seuil est la Limite supérieure d'inflammabilité, LSI. Ces deux limites sont généralement exprimées en pourcentage du volume de gaz inflammable dans le volume du mélange total. L'intervalle entre ces limites est le domaine d'inflammabilité au milieu duquel se situe la zone de la meilleure combustion lorsque les proportions du mélange correspondent exactement à la réaction chimique, sans excès de combustible ni de comburant, Cette condition correspond à la concentration stœchiométrique, qui assure, en théorie, la combustion complète, en flamme neutre, et donne la température la plus élevée.

La particularité de l'hydrogène est d'être un gaz hautement réactif et, de ce fait présente, une très large plage d'inflammation comme le montre le tableau 1 qui suit,

	LII	LSI
Hydrogène	4 %	75 %
Méthane	5 %	14 %
Propane	3 %	10 %
Butane	2 %	9 %

Tableau 1 – Limites d'inflammabilité de l'hydrogène et de combustibles courants

*En dessous de la limite inférieure d'inflammabilité, si l'inflammation ne peut se propager à l'ensemble de la masse gazeuse, le mélange gaz-air reste toutefois combustible et réagit au contact d'une flamme ou d'un filament métallique incandescent. Cette combustion trop pauvre en combustible, cesse immédiatement si on supprime la source d'énergie. Une propriété qui est mise en application dans certains explosimètres capables de mesurer des teneurs en gaz combustibles très au-dessous de la limite inférieure d'inflammabilité.*

#### Energie d'inflammation

L'énergie minimale d'inflammation varie en fonction de la concentration en hydrogène et en oxygène. A la concentration stœchiométrique (pour chaque molécule d'hydrogène il y a une demi-molécule d'oxygène), soit 29,5% en volume d'hydrogène dans l'air, sa valeur est de 17µJ/mole. Une énergie très faible comparée à celle des combustibles courants comme le montre le tableau 2 qui suit. Tableau qui montre également que l'hydrogène présente une valeur élevée de chaleur de combustion et une température de flamme voisine de celle des autres combustibles.

Gaz	Energie minimale d'inflammation mJ/mole	Chaleur de combustion kJ/g	Température de flamme °C	Température d'auto inflammation °C
H <sub>2</sub>	0,017	120	2 045	585-858
CH <sub>4</sub>	0,29	50	1 875	540
Propane	0,26	50	1 920	760
Essence	0,24	44,5	2 200	228-501

Tableau 2 - Inflammation de l'hydrogène et de combustibles courants

Ces propriétés font de l'hydrogène un gaz extrêmement inflammable. Sa très faible énergie d'inflammation correspond à des valeurs pouvant être obtenues par des décharges électrostatiques d'origine humaine. De nombreuses précautions doivent donc être prises lors de la mise en œuvre de ce gaz. Dans l'oxygène pur, cette énergie minimale d'inflammation est seulement de 3 µJ/mole, un point important pour la sécurité des électrolyseurs.

#### L'auto-inflammation

En l'absence d'une source de flamme, le mélange hydrogène-air compris dans les limites d'inflammabilité, peut s'enflammer spontanément s'il est porté à une certaine température : la température d'auto-inflammation, appelée aussi température d'auto-ignition ou d'auto-combustion. Cette température est fonction de la pression, elle se situe dans la plage comprise entre 585 et 858°C<sup>2</sup>, au-dessus de celles de la plupart des autres gaz inflammables (tableau 2 précédent),

#### 4. EXPLOSIVITE

Une explosion de gaz est une combustion instantanée qui se caractérise par une augmentation rapide de pression et de volume avec une importante libération d'énergie et généralement accompagnée d'une génération de hautes températures. Plus cette transformation s'effectue rapidement, plus il en résulte une surpression dont la détente jusqu'à la pression atmosphérique crée un souffle qui, selon sa vitesse, est déflagrant ou détonant avec une forte émission de bruit.

#### Limites d'explosivité, plage d'explosivité

Ces limites déterminent la plage d'explosivité qui est incluse dans la plage d'inflammabilité. Dans le cas de l'hydrogène à pression et température ambiantes, ces limites sont confondues<sup>3</sup> et vont de 4 à 75%<sup>4</sup>. Plus généralement l'étendue de la plage d'explosivité dans l'air est fonction de la température et de la pression. A pression constante, elle croît avec la température. Sinon, elle suit les variations de la pression pour des mélanges H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> (cf. Figure 2)

<sup>2</sup> La température d'auto-inflammation peut également être influencée par la nature des parois ou la présence de substances pouvant avoir une action d'activation (action catalytique) ou au contraire d'inhibition.

<sup>3</sup> De ce fait, domaine d'explosivité est le terme réglementaire, néanmoins on trouve parfois celui de « domaine d'inflammation ».

<sup>4</sup> En fait, à la concentration minimale de 4%, il n'y a guère d'explosion mais seulement inflammation.

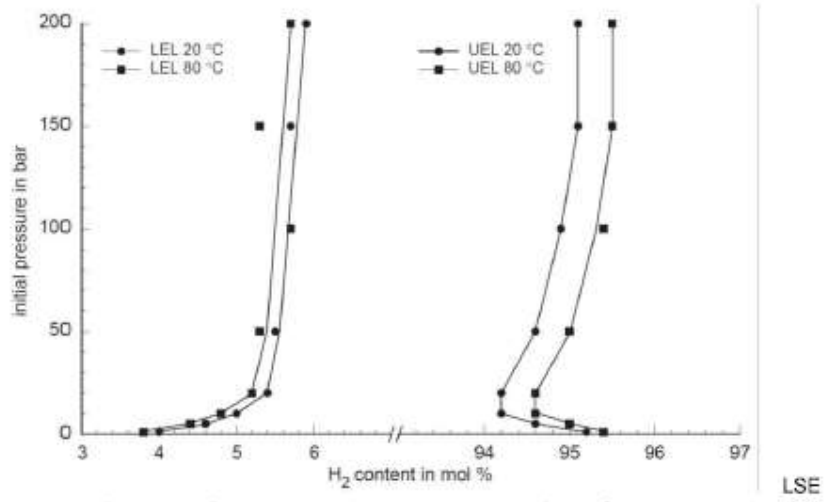


Figure 2 - LIE et des mélanges H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> en fonction de la pression et température<sup>5</sup>

La figure 3 qui suit met en évidence la largeur du domaine d'explosivité de l'hydrogène devant celui de deux hydrocarbures combustibles courants le méthane et le propane,

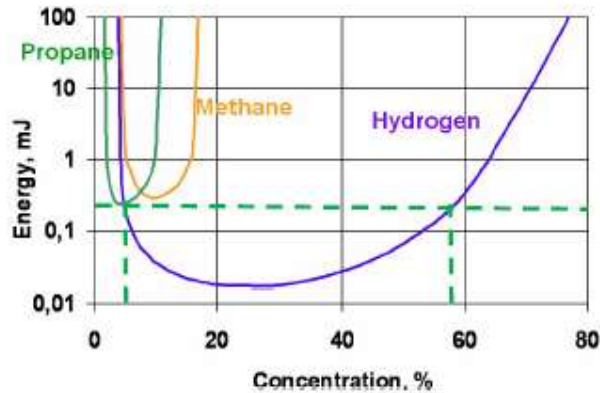


Figure 3 - Domaine d'explosivité de l'hydrogène du propane et du méthane

Le tableau 3 qui suit donne les vitesses de combustion et les énergies d'explosion comparées de l'hydrogène et du méthane.

<sup>5</sup> V. Schröder, B. Emonts, H. Janßen, H.-P. Schulze: Explosionsgrenzen von Wasserstoff/Sauerstoff-Gemischen bei Drücken bis 200 bar, *Chemie Ingenieur Technik* (75), 7/2003, S. 914-918



Propriétés	Unités	Hydrogène	Propane
Domaine d'explosivité	% vol	4 - 75	2,1 – 9,5
Vitesse de combustion	cm/s	265-325	30-40
Energie d'explosion	g TNT/g produit	24	10
	kg TNT/m <sup>3</sup> gaz (à PE)	2,02	20,3

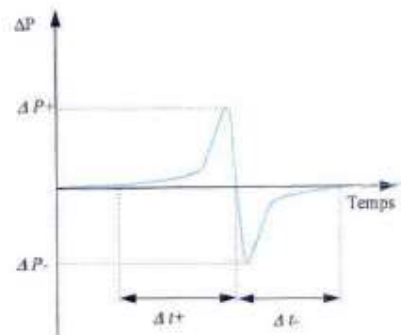
**Tableau 3** - Caractéristiques d'explosivité de l'hydrogène et du propane dans l'air à pression et température ambiantes

(sources : - Commission of the European Communities and the Gouvernement of Québec, novembre 1993 - ISO/PDTR 1 5916 Considérations fondamentales pour la sécurité des systèmes à hydrogène)

### Régimes d'explosion

Deux régimes d'explosion différents sont possibles :

- **La déflagration** : dans ce cas, le front de flamme se déplace à vitesse subsonique. Les gaz frais sont comprimés par l'expansion du volume des gaz enflammés (effet piston). Il en résulte une augmentation continue de la surpression.



**Figure 4** - la surpression

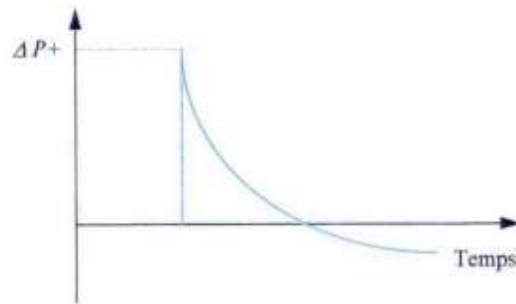
régime de déflagration

Evolution de pour un

(Source : Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre – INERIS, juillet 1999)

Pour l'hydrogène dans l'air aux conditions stœchiométriques, la célérité de déflagration est de 2,6 ms<sup>-1</sup>. En présence d'oxygène seul, cette célérité peut augmenter jusqu'à 11-12ms<sup>-1</sup>, une valeur qui peut encore être accrue dans des conditions de confinement (exemple, explosion dans une tube).

- **La détonation** : la vitesse du front de flamme est alors supersonique, le mélange hydrogène-comburant est comprimé dans des conditions quasi adiabatiques avec pour résultat la formation d'une onde de choc.



**Figure 5 - Evolution de la surpression pour un régime de détonation**  
(Source : Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre – INERIS, juillet 1999)

La plage de détonabilité varie en fonction de la géométrie du confinement, de l'énergie d'inflammation et du ratio du mélange des gaz. La littérature de combustion fournit des exemples de détonations de l'hydrogène se produisant avec des proportions voisines de 11%, voire inférieures. Il n'y a aucune procédure de mesure normalisée pour cette propriété, contrairement aux limites d'explosivité. A noter que dans la plage entre 4% à 8 % en volume d'hydrogène dans l'air, l'inflammation du mélange donne lieu au phénomène de « flash-fire », « feu de nuage » dont le principal effet est thermique qui même en l'absence de surpression, reste néanmoins un phénomène dangereux.

#### Quel régime pour quelle explosion ?

Le régime d'explosion dépend en premier lieu de la concentration de combustible dans le comburant. Dans le cas de l'hydrogène dans l'air, le régime de « flash-fire » évoqué ci-dessus se produit pour des concentrations allant de 4 à 8%. La déflagration, elle, peut se produire à partir de 8% et la détonation dans certaines configurations à partir de 11%. Des valeurs théoriques auxquelles s'ajoutent de nombreux autres paramètres. Lorsque l'explosion est amorcée, son état peut transiter de la déflagration à la détonation. Les facteurs influents sur cette transition sont ceux agissant sur la vitesse du front de flamme, c'est à dire :

- la turbulence créée par la présence d'obstacles qui favorisent l'accélération du front de flamme ;
- divers mécanismes tels que les perturbations acoustiques, les forces d'Archimède et les gradients de pression.

La large plage de détonation de l'hydrogène ainsi que les nombreux phénomènes de turbulences intrinsèques au nuage laissent présager, dans le cas d'une explosion, un régime ou de déflagration rapide ou de détonation.

## 5. CONCLUSION

Cet ensemble de données détermine avec précision quelles sont les indispensables mesures de sécurité à prendre et à respecter pour utiliser sans danger le combustible hydrogène. Et ce, tout particulièrement dans le contexte actuel du déploiement de ce vecteur d'énergie respectueux de l'environnement qui s'avère du plus haut intérêt pour le succès de la transition énergétique. Les Fiches 7.2 et 7.3 qui suivent traitent de cette sécurité ainsi que des normes et de la réglementation qui en découlent.

#### Pour en savoir plus

La combustion des gaz  
<http://cs.pontdechery.free.fr/livres/livre2/219.htm>

Rapport d'étude ineris 22/06/2015 n° dra-13-133211-12545a  
<https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/dra-13-133211-12545a-evaluation-des-proba-dinflammation-v8-1442302458.pdf>

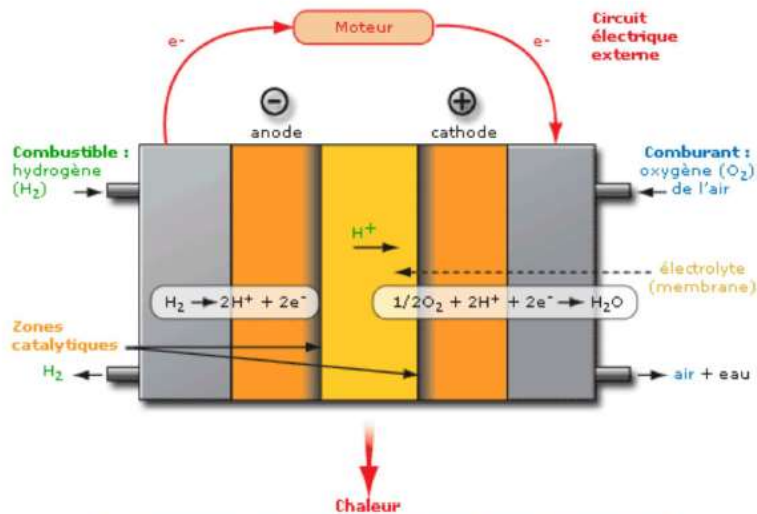
Fiche 7.1  
Révision - mai 2020  
Source INERIS, B.W. – AFHYPAC, P. M.

## 9.2 Annexe 2 - Principe de fonctionnement d'une pile à combustible PEMFC

Principe de fonctionnement d'une pile à combustible

Principe d'une pile à membrane polymère échangeuse de protons – PEMFC)

- Deux électrodes séparées par un électrolyte
- À l'anode injection d'hydrogène :  $H_2$  donne  $2H^+ + 2e^-$
- Les électrons circulent dans le circuit extérieur = courant électrique de la pile
- Les protons  $H^+$  traversent l'électrolyte (« membrane isolante »)
- À la cathode injection d'oxygène (air) :  $\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^-$  donne  $H_2O$



<http://www.ademe.fr/entreprises/Energie/demain/pilecomb.asp>

Les caractéristiques générales d'une cellule basique retiennent :

- Tension d'une cellule : 0,5 à 1V
- Densité de courant : 0,5 A/cm<sup>2</sup> (10A = 20 cm<sup>2</sup>)
- En moyenne 2 kW/litre (dimensions de la pile seule)
- Tant qu'il y a de l'hydrogène et de l'oxygène, il y a de l'électricité

La pile la plus puissante disponible a une puissance de 200 kW (Ballard- FCVelocity-XD)

- Durée de vie d'une pile : 25 000 heures

La durée de vie est réduite si l'utilisation est menée en variation de puissance. L'utilisation à puissance constante est préférable).

On note que le rendement est optimal à 75% de la puissance

La tension débitée variable : 400-580 V => nécessite convertisseur DC-DC

Les qualités et conditions de fonctionnement de la pile impose des contraintes sur la pureté de l'hydrogène l'alimentant, à savoir :

- $H_2 > 99.9999\%$ ,
- $CO_2$  5 ppm,
- $NH_3$  1 ppm,
- $CO$  0.1 ppm,
- $H_2O$  5 ppm (dew point -65.4 °C),

En cas de recours à une station d'avitaillement, elle devra être compatible avec une atmosphère marine permanente : matériaux inoxydables et/ou protection anticorrosion, pas de couples électrolytiques susceptibles d'amorcer une corrosion galvanique, protection cathodique, etc...

## 9.3 Annexe 3 – BV NR547 – Extrait – Section 5 §1.3 Area classification

### 1.3 Area classification

#### 1.3.1 Hazardous areas zone 0

This zone includes, but is not limited to, interiors of buffer tanks, reformers, pipes and equipment containing low-flashpoint fuel or reformed fuel, any pipework of pressure-relief or other venting.

Note 1: Additionally, instrumentation and electrical apparatus in contact with the gas or liquid gas are to be of a type suitable for zone 0. Temperature sensors installed in thermo wells, and pressure sensors without additional separating chamber are to be of intrinsically safe type Ex-ia.

#### 1.3.2 Hazardous areas zone 1

This zone includes, but is not limited to:

- Areas on open deck, or semi- enclosed spaces on deck, within 3 m of any reformed fuel or purge gas outlets or fuel cell space ventilation outlets and around reformed fuel valves or flanges
- Fuel cell exhaust air and exhaust gas outlets
- Areas on open deck or semi-enclosed spaces on deck within 1.5 m of fuel cell space entrances, fuel cell space ventilation inlets and other openings into zone 1 spaces.
- Areas on open deck or semi-enclosed spaces within 3 m of other sources of release of reformed fuel
- Fuel cell spaces
- Enclosed or semi-enclosed spaces in which pipes containing fuel are located, e.g. ducts around fuel pipes whatever their arrangement.

#### 1.3.3 Hazardous areas zone 2

This zone includes, but is not limited to:

- Areas within 1.5 m surrounding open or semi-enclosed spaces of zone 1 as specified above, if not otherwise specified
- Airlocks.

#### 1.3.4 Ventilation ducts

Ventilation ducts are to have the same area classification as the ventilated space.

#### 1.3.5 Fuel cell spaces

According to [1.3.2], fuel cell spaces are considered as hazardous zone 1 and all electrical equipment is to be certified for zone 1. The fuel cell stack itself is not considered a source of ignition if the surface temperature of the stack is kept below 300°C in all operating conditions and the fuel cell power system is capable of immediately isolating and de-energizing the fuel cell stack under every load and operating condition.