Antwerp Maritime Academy

Approche pédagogique dans le cadre de la création d'un cours sur l'utilisation de l'hydrogène comme carburant maritime

Maxime Bruyere

Mémoire présenté pour l'obtention
du titre de Master en Sciences Nautiques
à la Hogere Zeevaartschool

Promoteur: Geert Potters
& Helen Verstraelen
Année académique 2025-2026

Avant-propos

Ce mémoire porte sur l'élaboration d'une approche pédagogique visant à la création d'un cours sur l'utilisation de l'hydrogène comme carburant maritime. Cette étude développe d'abord l'approche théorique des aspects physiques et chimiques fondamentaux de l'hydrogène, des réglementations applicables à son utilisation et de ses modalités opérationnelles. Pour ensuite développer cette approche pédagogique selon la méthode de « model course outline ».

Remerciements :

Je tiens à remercier tout particulièrement mes promoteurs, Madame Helen Verstraelen et Monsieur Geert Potters pour leurs conseils avisés. Ainsi que Madame Deirde Luyck pour son aide. Je tiens à remercier également mes parents pour leur soutien, la relecture de mon travail et leur avis éclairant. Un grand merci tout particulier à ma compagne pour ses encouragements et d'être mon alliée de tous les instants.

Résumé

Ce mémoire explore la conception d'une approche pédagogique pour former le personnel naviguant à l'utilisation de l'hydrogène comme carburant maritime. Face à l'urgence climatique, l'auteur souligne un décalage critique entre l'innovation technologique et le cadre réglementaire international (Code IGF), actuellement centré sur le GNL et partiellement inadapté aux propriétés uniques de l'hydrogène.

S'appuyant sur la méthode « Model Course Outline », le travail propose un cursus structuré en huit modules qui sont : 1) introduction et propriétés fondamentales de l'hydrogène, 2) production et classification, 3) cadre réglementaire et Code IGF, 4) dangers et risques pour la santé, 5) conception technique et stockage (LH_2 vs CH_2), 6) sécurité opérationnelle et inertage, 7) détection et lutte contre l'incendie, 8) équipements de protection individuelle.

En conclusion, si une formation théorique est réalisable dès maintenant, ce cadre pédagogique est conditionné par l'état d'avancement des solutions techniques et des réglementations applicables qui freinent le développement d'une formation complète. Par conséquent, le contenu du cours est appelé à évoluer régulièrement afin de refléter les innovations et les ajustements réglementaires en vigueur.

Abstract

Pedagogical Approach for Developing a Course on the Use of Hydrogen as a Maritime Fuel

This thesis explores the design of a pedagogical approach to train seafarers in the use of hydrogen as a maritime fuel. Faced with the climate emergency, the author highlights a critical gap between technological innovation and the international regulatory framework (IGF Code), currently centered on LNG and partially unsuited to the unique properties of hydrogen.

Based on the "Model Course Outline" method, the work proposes a structured curriculum composed of eight modules which are: 1) introduction and fundamental properties of hydrogen, 2) production and classification, 3) regulatory framework and IGF Code, 4) hazards and health risks, 5) technical design and storage (LH_2 vs CH_2), 6) operational safety and inerting, 7) detection and firefighting, 8) personal protective equipment.

In conclusion, while theoretical training is already feasible, this pedagogical framework is conditioned by the progress of technical solutions and applicable regulations, which slows the development of a comprehensive training program. Consequently, the course content is expected to evolve regularly to reflect ongoing innovations and regulatory adjustments in application.

Table des matières

Liste des figures viii
Liste des tableaux ix
Liste d'abréviation x
1 Introduction 1
2 L'hydrogène comme carburant, propriétés et spécifications. 3
2.1 Définition 3
2.2 Propriétés physiques 3
2.3 Propriétés chimiques 3
2.4 Synthèse 5
2.4.1 Vaporeformage du méthane : Procédé thermochimique dominant 6
2.4.2 Purification de l'hydrogène 6
2.4.3 Électrolyse de l'eau : voies électrochimiques 7
2.4.4 Électrolyse alcaline (AEL) 7
2.4.5 Électrolyse PEM 8
2.4.6 Électrolyse à haute température (SOEC) 8
2.4.7 Gazéification de la biomasse : Conversion thermochimique des matières organiques 9
2.4.8 Cycles thermochimiques : Le cycle Iode-Soufre (I-S) 10
2.5 Couleurs d'hydrogène et leurs significations 11
2.5.1 Hydrogène Vert 11
2.5.2 Hydrogène Rose 12
2.5.3 Hydrogène Gris 12
2.5.4 Hydrogène Bleu 13
2.5.5 Hydrogène Noir 13
2.5.6 Hydrogène Brun 13
2.5.7 Hydrogène Blanc 13
2.5.8 Hydrogène Jaune 13
2.6 Applications de l'hydrogène dans le monde maritime actuel et dans d'autres secteurs 14
2.7 Risques pour la santé, l'environnement et les dangers de l'hydrogène 16
2.7.1 Propriétés et risques associés à l'hydrogène 16
2.7.2 Risque d'utilisation 17

2.7.3 Utilisation comme carburant 18
3 Applicabilité du Code IGF à l'hydrogène comme carburant 19
3.1 Histoire 19
3.2 But du code 19
3.3 Évolution du Code IGF 20
3.4 État actuel du Code IGF pour l'hydrogène dans les institutions compétentes 22
4 Spécificités techniques et principes de protection : Adapter la sécurité maritime à l'hydrogène 25
4.1 Principes de sécurité du code IGF pour le transport du gaz naturel 25
4.1.1 Ségrégation 26
4.1.1.1 Ségrégation vis-à-vis des dommages mécaniques 26
4.1.1.2 Ségrégation vis-à-vis des charges thermiques externes 26
4.1.1.3 Zones dangereuses et maîtrise des sources d'inflammation 27
4.1.2 Intégrité du système 27
4.1.2.1 Exigences de conception pour réduire les risques de fuites 27
4.1.2.2 Contrôle des rejets opérationnels et d'urgence du système de carburant 28
4.1.3 Double barrière 28
4.1.3.1 Canalisations (piping) 28
4.1.3.2 Concept d'espace machine protégé par un système d'arrêt d'urgence (ESD) 29
4.1.3.3 Espaces à double barrière (par exemple, espace de connexion des cuves, salle de préparation du carburant) 29
4.1.3.4 Ventilation 29
4.1.3.5 Ouvertures d'accès entre zones dangereuses et non dangereuses 30
4.1.4 Détection des fuites 30
4.1.5 Isolement automatique des fuites 30
4.2 Dangers d'utilisation de l'hydrogène à bord 30
4.2.1 Une inflammabilité et une sensibilité à l'allumage extrêmes 30
4.2.2 Risque élevé de détonation 31
4.2.3 Températures cryogéniques et condensation de l'air 31
4.2.4 Capacité de fuite et diffusion 31
4.2.5 Fragilisation des matériaux 32
4.3 Analyse technique liée à l'hydrogène 32
4.3.1 Typologie des réservoirs : LH_2 vs CH_2 32

4.3.2 Choix des alliages pour la tuyauterie résistant à l'hydrogène 35
4.3.3 L'inertage : le défi du gel et de l'hélium 36
4.3.4 Gestion des fuites d'hydrogène 37
4.3.5 Lutte incendie contre un feu d'hydrogène 39
4.3.5.1 Mesures pour combattre le feu d'hydrogène 39
4.3.5.2 Systèmes de détection 40
4.4 Protection contre les dangers de l'hydrogène 40
4.4.1 Protection contre l'inflammation 40
4.4.2 Protection cryogénique renforcée (LH_2) 41
4.4.3 Risque d'enrichissement en oxygène 41
4.4.4 Protection respiratoire et faciale 41
5 Objectif de la recherche 42
6 Model Course Outline method 43
6.1 Étape 1 : Définir notre audience 43
6.2 Étape 2 : Déterminer des objectifs d'apprentissage clairs 43
6.2.1 Savoir 43
6.2.2 Savoir-faire 45
6.3 Étape 3 : Compartimenter le cours en modules 48
6.4 Étape 4 : Organiser les leçons pour chaque module 50
6.5 Étape 5 : Activités et matériel 52
6.6 Étape 6 : Évaluation des connaissances 54
6.7 Étape 7 : Temps recommandé pour la formation 54
6.8 Étape 8 : Finaliser le cours avec une introduction et une conclusion 55
7 Discussion 56
7.1 Comparaison avec le méthanol 56
7.2 Piste pour de futurs travaux 57
8 Conclusion 59
9 Bibliographie 61
10 Annexes 68
10.1 Liste des compétences pour la formation IGF et trainalter de l'EMSA 68
10.2 Table des matières de la formation IGF spécialisée pour le méthanol de l'Antwerp Maritime Academy. 81

Liste des figures

Figure 1: couleur des méthodes de production d'hydrogène 11
Figure 2: production des hydrogènes vert et rose 12
Figure 3: production de l'hydrogène gris 12
Figure 4: production de l'hydrogène bleu 13
Figure 5: projet JAMILA un LH_2 carrier 14
Figure 6: navire Hydrobingo par CMB.TECH 15
Figure 7: navire Hydrocat 55 par CMB.TECH 15
Figure 8: navire Hydrotug par CMB.TECH 15
Figure 9: navire fluvial ZULU06 par Sogestran 16
Figure 10: les cinq principes de sécurité pour le code IGF 25
Figure 11: schéma d'une cuve LH_2 33
Figure 12: schéma d'un container de types IV pour le CH_2 33
Figure 13: diagramme d'un système d'hydrogène liquide comme carburant 34

Liste des tableaux

Tableau 1: propriétés chimiques de l'hydrogène 4
Tableau 2 : propriétés physiques de l'hydrogène 5

« Ce mémoire a utilisé l'intelligence artificielle comme moyen de révision, de correction pour la grammaire et l'orthographe ainsi que moyen d'aide à la mise en page. »

Liste d'abréviation

AEL: Alkiline Electrolysis

BLEVE : Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion

CCC : Carriage of Cargoes and Containers

CFC : Cubique à Face Centré (structure cristalline)

CFD : Computational Fluid Dynamics

CLO : Concentration Limite d'Oxygène

CSC : Captage de Stockage de Carbone

CTV : Crew Transport Vessel

DDT : Deflagration-Detonation Transition

ECTS : European Credit Transfert and Accumulation System

EFV : Excess Flow Valve

EMSA : European Maritime Safety Agency

EPI : Equipement de Protection Individuelle

ESD : Emergency Shutdown System

FDS : Fiche de Données de Sécurité

GNL : Gaz Naturel Liquéfié

IGC : International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk

IGF : International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk

KUP : Knowledge Understanding and Proficiency

LEL : Low Explosion Limit

MSC : Maritime Safety Committee

OMI : Organisation Maritime International

PEM : Proton Exchange Membrane

PSA : Pressure Swing Adsorption

PRV : Pressure Release Valve

RFO : Restrictif Flow Orifice

SCBA : Self-Contained Breathing Apparatus

SGMF : Society for Gas as Marine Fuel

SMR : Steam Methane Reforming

SOLAS : Safety Of Life At Sea

SOEC : Solid Oxide Electrolyser Cell

TCE : Tanke Connection Enclosure

TCS : Tank Connection Space

TIG : Tungsten Inert Gas welding

TPRD : Thermal Pressure Release Device

UV/IR : Ultra-Violet/ Infra-Red

VR : Virtual Reality

1 Introduction

Le secteur maritime mondial traverse actuellement une mutation sans précédent, impulsée par l'urgence climatique qui impose une réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre (Xing et al., 2021). Dans cette quête de décarbonation, l'hydrogène s'impose comme une solution d'avenir prometteuse, capable de n'émettre que de l'eau lors de sa combustion même si le bilan carbone de sa fabrication est mitigé (Wei et al., 2024). Cependant, si l'innovation technologique progresse, avec des projets tels que le navire *JAMILA* ou l'*Hydrotug* à Anvers, elle se heurte à un défi de taille : la sécurité opérationnelle et la formation du personnel naviguant qui opérera ces systèmes complexes (Alkhaledi et al., 2022; CMB.TECH, s. d.).

L'intégration de l'hydrogène comme carburant maritime ne se résume pas à une simple substitution du fioul lourd ou du gaz naturel liquéfié (GNL). Ses propriétés physiques et chimiques uniques en font un combustible particulièrement exigeant. Entreposé sous forme liquide (LH_2) à une température cryogénique de -253°C, ou sous forme comprimée (CH_2) à des pressions atteignant 700 bar, l'hydrogène présente des risques de fragilisation des matériaux, d'auto-inflammation par effet Joule-Thomson positif, et une inflammabilité extrême avec des flammes quasiment invisibles (Mekonnin et al., 2025; SGMF, 2025).

Le problème central réside dans le décalage critique entre cette innovation et le cadre réglementaire international. Le Code IGF, qui régit actuellement les navires utilisant des carburants à bas point d'éclair, a été conçu principalement pour le GNL. De nombreuses dispositions actuelles, telles que l'utilisation de l'azote pour l'inertage ou le concept d'espace machine protégé par ESD, s'avèrent inadaptés, voire dangereux, pour l'hydrogène. À ce jour, il n'existe aucune formation spécifique harmonisée au niveau international pour préparer les équipages à ces dangers (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024).

L'objectif de ce mémoire est double. Il s'agit, d'une part, de concevoir une approche pédagogique structurée pour la formation du personnel naviguant, couvrant à la fois les connaissances théoriques (« Savoir ») et les compétences opérationnelles (« Savoir-faire »). D'autre part, ce travail vise à évaluer la pertinence et la faisabilité de la mise en œuvre d'un tel cursus dans un environnement où la réglementation est encore en gestation. Il s'agit de passer d'une simple culture de l'exploitation à une véritable culture du risque proactive.

Pour répondre à ces objectifs, la recherche s'est articulée autour de la méthode « Model Course Outline », structurée en huit étapes. Le travail s'appuie sur une analyse approfondie des rapports de l'EMSA (European Maritime Safety Agency) et des résolutions de l'OMI (Organisation Maritime Internationale), tout en effectuant une comparaison critique avec les formations existantes pour d'autres carburants alternatifs, comme le méthanol. Cette démarche a permis d'identifier les lacunes du Code IGF actuel et de définir les compétences spécifiques indispensables au personnel naviguant.

Le présent mémoire est structuré en plusieurs chapitres.

- Le premier chapitre détaille les propriétés physiques et chimiques de l'hydrogène, ainsi que ses différents modes de production, classés par « couleurs » selon leur empreinte carbone.
- Le deuxième chapitre analyse le cadre réglementaire actuel, en soulignant les limites du Code IGF face à ce nouveau vecteur énergétique.
- Le troisième chapitre se concentre sur les spécificités techniques et les principes de protection, abordant les défis majeurs tels que l'inertage à l'hélium et la détection acoustique des fuites.
- Le quatrième chapitre explique l'objectif de la recherche et le cinquième chapitre expose la conception détaillée de la formation, découpée en huit modules pédagogiques allant de la théorie fondamentale à la lutte contre l'incendie.

Enfin, une discussion portera sur la mise en place d'une culture de sécurité optimale et sur les perspectives d'évolution du secteur à l'horizon 2028. Ce travail jette ainsi les bases d'un cadre éducatif nécessaire pour garantir que la transition énergétique maritime ne se fasse pas au détriment de la sécurité des vies humaines en mer.

2 L’hydrogène comme carburant, propriétés et spécifications.

2.1 Définition

L’hydrogène est un gaz inodore et incolore constitué par les molécules diatomiques H_2 ; c’est le plus léger de tous les éléments chimiques (Jolly, 2026) . L’hydrogène est l’élément le plus abondant de l’univers, mais il ne représente que 0,9 % en poids de la croûte terrestre en raison de la faiblesse de l’attraction de la Terre par rapport à d’autres astres. La concentration de l’hydrogène dans l’atmosphère est constante à une altitude de 80 km, ce qui correspond à la troposphère et à la stratosphère. Cette concentration augmente dans l’exosphère (Hagenmuller Paul, s.d). Il y a trois isotopes d’hydrogène : le protium, de masse 1, trouvé dans plus de 99,98 % de l’élément normal ; le deutérium, de masse 2, trouvé dans la nature à approximativement 2 %, et le tritium, de masse 3, qui apparaît en petite quantité dans la nature (tableau 1). Il peut être produit artificiellement par diverses réactions nucléaires (Jolly, 2026).

2.2 Propriétés physiques

La plupart des propriétés caractérisent la légèreté de l'hydrogène : densité très faible (l'air est 14,5 fois plus dense), facilité de diffusion à travers les parois métalliques, effusion à travers les pores (tableau 2). La faiblesse des forces de Van der Waals explique les bas points d'ébullition (20,4 K) et de fusion (14,1 K) et le comportement de gaz parfait (Jolly, 2026).

2.3 Propriétés chimiques

L'hydrogène était déjà connu des alchimistes, qui le préparaient par action des acides sur les métaux sous le nom d'air inflammable. Cavendish fut le premier à le recueillir dans une cloche à mercure et c'est Lavoisier qui lui donna son nom (Levere, 2026; Usselman & Rocke, 2026).

La stabilité thermique de la molécule d'hydrogène explique sa faible réactivité à basse température. Il faut amorcer les réactions à chaud ou utiliser un catalyseur qui favorise sa dissociation. La présence de l'unique électron sur un niveau de faible énergie (le niveau 1*s* à l'état fondamental) explique la valeur élevée du potentiel d'ionisation (13,6 *e*V) – du même ordre de grandeur que celle du krypton. La conséquence en est l'absence de composés solides contenant l'hydrogène sous forme d'ions H^+. L'affinité faible, mais positive (67 kJ. $mole^{-1}$), limite l'existence d'ions H^- aux combinaisons avec les éléments les plus électropositifs, donc les plus faciles à ioniser. Ces remarques expliquent que, dans la plupart de ses composés chimiques, l'hydrogène possède des liaisons fortement covalentes (Jolly, 2026).

Bien qu'en général il soit diatomique, l'hydrogène moléculaire se dissocie dans les atomes libres à températures élevées. L'hydrogène actif est un agent réducteur puissant, même à température ambiante. Il réagit avec les oxydes et les chlorures de beaucoup de métaux, comme l'argent, le cuivre, le plomb, le bismuth et le mercure, pour produire des métaux libres (Jolly, 2026).

Il ramène quelques sels à leur état métallique, comme les nitrates, les cyanures à nitrites, à sodium et à potassium. Il réagit avec un certain nombre d'éléments, métaux et non-métaux, et produit des hydrures, comme NAH, KH, H_2S et PH_3. L'hydrogène actif produit le peroxyde d'hydrogène, H_2O_2, avec l'oxygène (Jolly, 2026).

Tableau 1: propriétés chimiques de l'hydrogène

Source :(*hydrogène, propriétés chimiques, effets sur la santé et l'environnement*, s. d.)

Numéro atomique	1
Masse atomique	1.007825 $g.mol^{-1}$
Electronégativité de Pauling	2,1
Masse volumique	$0,0899.10^{-3}$ $g.cm^{-3}$ à 20 °C
Température de Fusion	- 259,2 °C
Température d'ébullition	- 252,8 °C
Rayon atomique (Van der Waals)	0,12 nm
Rayon ionique	0,208 (-1) nm
Isotopes	Le protium, le deutérium et le tritium (respectivement 0, 1 et 2 neutrons)
Configuration électronique	$1s^1$
Energie de première ionisation	1311 $kJ.mol^{-1}$

L'hydrogène actif réagit avec les composés organiques pour former un mélange complexe des produits ; avec l'éthylène, C_2H_4, ces produits sont l'éthane, C_2H_6, et le butane, C_4H_{10}. L'hydrogène réagit avec l'oxygène pour former de l'eau et cette réaction est extraordinairement lente à température ambiante ; mais si elle est accélérée par un catalyseur, comme le platine, ou une étincelle électrique, elle est produite avec une violente explosion (Jolly, 2026).

Tableau 2 : propriétés physiques de l'hydrogène

Source : (Alkhaledi et al., 2022)

Table 2. Physical properties of hydrogen (Colozza and Kohout 2002; Bourne 2012).

Property	Hydrogen	Unit
Density (gaseous)	0.089	kg/m^3 (@ 0 °C, 1 bar)
Density (liquid)	70.79	kg/m^3 (@ −253 °C, 1 bar)
Boiling point	−253	°C (@ 1 bar)
Energy per unit of mass (LHV)	120.1	MJ/kg
Energy density (ambient conditions, LHV)	0.01	MJ/L
Specific energy (liquefied, LHV)	8.4	MJ/L
Flame velocity	346	cm/s
Ignition range	4–77	% in air by volume
Autoignition temperature	585	°C
Ignition energy	0.02	MJ

Note: LHV = lower heating value.

2.4 Synthèse

L'hydrogène est une matière première essentielle de l'industrie chimique tant minérale qu'organique. Quatre procédés de fabrication sont utilisés. Le plus courant est la conversion catalytique des hydrocarbures du gaz naturel : oxydation par l'eau, le dioxyde de carbone ou l'oxygène, avec formation de monoxyde de carbone et d'hydrogène, qu'il faut ensuite séparer ; par exemple, à partir du méthane :

$$2\,CH_4 + O_2 \rightarrow 2CO + 4H_2$$

L'hydrogène est un des produits du gaz de craquage du pétrole ou du charbon. Il représente, par exemple, 50 % environ en volume du gaz des cokeries. Une troisième méthode consiste à l'extraire du « gaz à l'eau » obtenu par action à 900°C de la vapeur d'eau sur le coke. Le monoxyde de carbone formé en même temps que l'hydrogène est généralement éliminé par dissolution sous pression après oxydation catalytique en dioxyde. Enfin l'hydrogène le plus pur, mais aussi le plus coûteux, est obtenu par électrolyse d'une solution aqueuse généralement alcaline (Hagenmuller Paul, s.d; Jolly, 2026).

2.4.1 Vaporeformage du méthane : Procédé thermochimique dominant

Mécanismes réactionnels et conditions opératoires :

Le vaporeformage du méthane (SMR, Steam Methane Reforming) est le procédé industriel le plus utilisé pour produire de l'hydrogène. Il repose sur deux réactions chimiques successives :

Réaction de reformage (700–1 000°C, catalyseur Ni/Al_2O_3) :

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2 (\Delta H^\circ = +206 \text{ kJ/mol})$$

Cette réaction est fortement endothermique et nécessite un apport thermique important, généralement fourni par la combustion d'une partie du méthane. Le catalyseur à base de nickel favorise la rupture des liaisons C–H du méthane et la formation de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène (H_2) (Szablowski et al., 2025)

Réaction de water-gas shift (300–500°C) :

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 (\Delta H^\circ = -41 \text{ kJ/mol})$$

Cette réaction est exothermique et permet d'augmenter le rendement en hydrogène tout en convertissant le CO en CO_2 (Szablowski et al., 2025)

2.4.2 Purification de l'hydrogène

L'hydrogène est produit et séparé des impuretés (CO_2, CO, CH_4, H_2O) par absorption modulée en pression (PSA, Pressure Swing Adsorption), un procédé qui permet d'atteindre une pureté supérieure à 99 % (You et al., 2012).

Défis techniques :

Gestion thermique *:* Le procédé nécessite un apport de chaleur important, souvent fourni par la combustion du méthane, ce qui limite son efficacité globale.

Émissions de CO_2 *:* Pour chaque tonne d'hydrogène produite, 10 à 11 tonnes de CO_2 sont émises, ce qui en fait un procédé peu compatible avec les objectifs de décarbonation (Dewangan et al., 2026).

Captage du CO_2 : L'intégration de technologies de captage et stockage du carbone (CSC) est possible, mais elle complexifie le procédé et réduit son rendement énergétique (Rosa & Mazzotti, 2022).

2.4.3 Électrolyse de l'eau : voies électrochimiques

L'électrolyse de l'eau est une méthode électrochimique permettant de dissocier l'eau en hydrogène et oxygène sous l'effet d'un courant électrique. Trois technologies principales sont utilisées : l'électrolyse alcaline, le PEM (Proton Exchange Membrane) et la dissociation à haute température (SOEC).

2.4.4 Électrolyse alcaline (AEL)

Électrolyte : Solution aqueuse de potasse (KOH, 20–30 % en masse) (Tüysüz, 2024).

Réactions :

Anode (oxydation) :

$$2OH^- \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^-$$

Cathode (réduction) :

$$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$$

Rendement : Le rendement énergétique se situe entre 60 % et 70 %, limité par les surpotentiels et les pertes ohmiques (Acar & Dincer, 2018)

Défis :

- Corrosion des électrodes en milieu basique (Liu et al., 2023).

2.4.5 Électrolyse PEM

Électrolyte : Membrane polymère conductrice de protons (Carmo et al., 2013)

Réactions :

Anode :

$$H_2O \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^-$$

Cathode :

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$$

Rendement : 65–75%, grâce à une haute densité de courant (1–2 A/cm²) et une réactivité élevée (Dermirci & Miele, 2010; Carmo et al., 2013)

Avantages : Conception compacte du système, réponse rapide du système (Carmo et al., 2013).

Défis : Coût élevé des catalyseurs (platine, iridium). Dégradation de la membrane sous des conditions cycliques (Acar & Dincer, 2018; Carmo et al., 2013).

2.4.6 Électrolyse à haute température (SOEC)

Électrolyte : Céramique conductrice d'ions O^{2-} (YSZ, Yttria-Stabilized Zirconia) (Stempien et al., 2014)

Réactions :

- Cathode :

$$H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + O^{2-}$$

- Anode :

$$O^{2-} \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2e^-$$

Température : 700 – 1000°C, ce qui permet d'atteindre un rendement de 80–90% grâce à l'apport thermique qui réduit les besoins en électricité (Acar & Dincer, 2018; Stempien et al., 2014) .

Défis :

- Dégradation des matériaux à haute température (corrosion, fissuration) (Sohal et al., 2012).
- Scellement des cellules pour assurer l'étanchéité (Peigat et al., 2014).

2.4.7 Gazéification de la biomasse : Conversion thermochimique des matières organiques

La gazéification de la biomasse permet de convertir des matières organiques (déchets agricoles, sylvicoles, ménagers) en un gaz de synthèse (syngas), composé principalement de CO et H_2. Ce procédé se déroule en plusieurs étapes :

Étapes du procédé :

- *Séchage et pyrolyse (200–500°C)* : Libération de composés volatiles.
- *Gazéification (800–1200°C)* : Réaction avec O_2/vapeur d'eau pour produire du syngas.
- *Nettoyage du syngas* : Élimination des goudrons, particules et composés soufrés (H_2S).
- *Réaction de water-gas shift* : Conversion du CO en CO_2 et production supplémentaire de H_2 (Cao et al., 2020; France Hydrogène, 2014).

Réaction globale :

$$C_6H_9O_4 + 2H_2O \rightarrow 6CO + 6{,}5H_2$$

Défis techniques :

Gestion des goudrons : Les goudrons encrassent les catalyseurs et les équipements, nécessitant des filtres à haute température (Dermirci & Miele, 2010).

Variabilité de la biomasse : La composition variable de la biomasse impacte la qualité du syngas produit (Acar & Dincer, 2018)

2.4.8 Cycles thermochimiques : Le cycle Iode-Soufre (I-S)

Le cycle Iode-Soufre (I-S) est un procédé thermochimique permettant de dissocier l'eau en hydrogène et oxygène à des températures inférieures à 1 000°C. Il se compose de trois réactions principales (Barbarossa et al., 2006):

Réactions du cycle I-S :

- Réaction de Bunsen (20–100 °C, exothermique) :

$$I_2 + SO_2 + 2H_2O \rightarrow 2HI + H_2SO_4$$

- Décomposition de HI (300–500 °C, endothermique) :

$$2HI \rightarrow H_2 + I_2$$

- Décomposition de H_2SO_4 (800–900 °C, endothermique) :

$$H_2SO_4 \rightarrow SO_2 + H_2O + \frac{1}{2}O_2$$

Bilan global :

Le bilan global du cycle I-S est la dissociation de l'eau :

$$H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2}O_2$$

Défis techniques :

- *Corrosion* : Les acides (HI, H_2SO_4) nécessitent des matériaux résistants (tantale, alliages spéciaux) (Gypen et al., 1984; Luo et al., 2025).
- *Séparation des produits* : La distillation des acides et la purification des gaz sont des étapes complexes et énergivores (Dermirci & Miele, 2010).

2.5 Couleurs d'hydrogène et leurs significations

L'hydrogène est classé selon des « couleurs » (figure 1) qui reflètent son mode de production et son empreinte carbone. Cette classification permet d'évaluer son rôle dans la transition énergétique et son adéquation avec les objectifs de décarbonation.

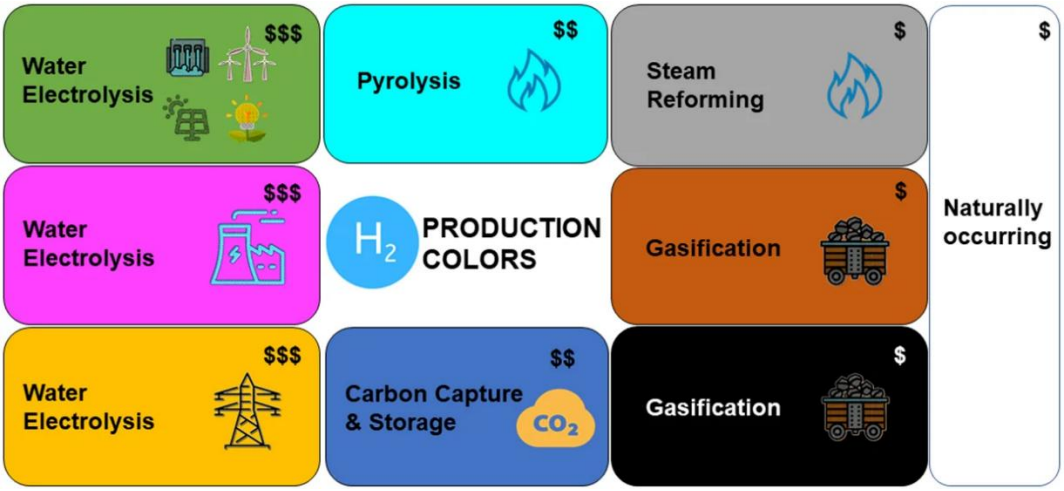


Figure 1: couleur des méthodes de production d'hydrogène

Source :(Arcos & Santos, 2023)

2.5.1 Hydrogène Vert

Procédés de Production : L'hydrogène vert (figure 2) est produit par électrolyse de l'eau, un procédé utilisant un courant électrique pour dissocier les molécules d'eau (H_2O) en hydrogène (H_2) et oxygène (O_2). L'électricité nécessaire provient exclusivement de sources renouvelables (éolien, solaire, hydroélectricité), garantissant une production sans émissions de CO_2 (Lefèvre, 2025).

Figure 8 - Green and Pink Hydrogen Pathway



Figure 2: production des hydrogènes vert et rose

Source :(SGMF, 2025)

2.5.2 Hydrogène Rose

Procédés de Production : L'hydrogène rose est produit par électrolyse de l'eau, en utilisant exclusivement l'énergie nucléaire comme source d'électricité (Panić et al., 2022).

2.5.3 Hydrogène Gris

Procédés de Production : L'hydrogène gris (figure 3) est produit par reformage à la vapeur de combustibles fossiles, principalement du gaz naturel (méthane, CH_4). Ce procédé génère d'importantes quantités de CO_2, rejetées directement dans l'atmosphère (Lefèvre, 2025).

Figure 5 Grey Hydrogen Pathway

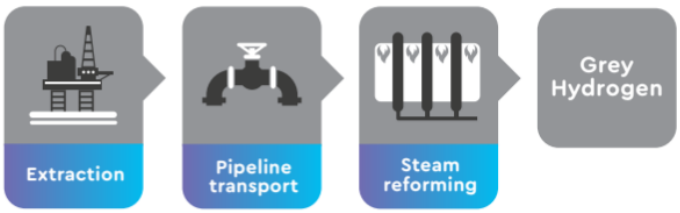


Figure 3: production de l'hydrogène gris

Source :(SGMF, 2025)

2.5.4 Hydrogène Bleu

Procédés de Production : L'hydrogène bleu (figure 4) repose sur les mêmes procédés que l'hydrogène gris, mais intègre un système de captage et stockage du CO_2 (Carbon Capture and Storage). Le CO_2 émis lors du reformage est capturé avant d'être libéré dans l'atmosphère (Lefèvre, 2025).

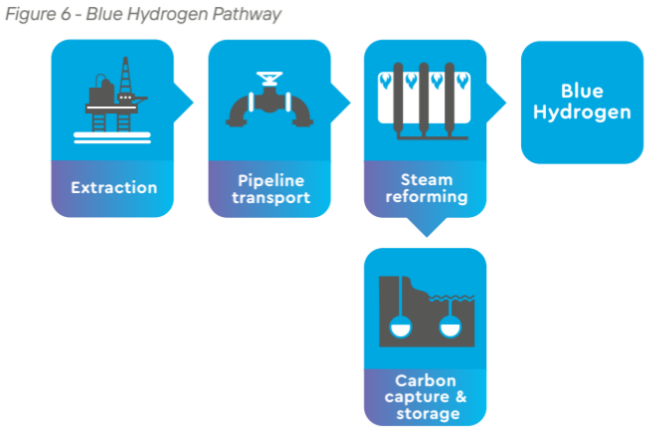


Figure 4: production de l'hydrogène bleu

Source :(SGMF, 2025)

2.5.5 Hydrogène Noir

Procédés de Production : L'hydrogène noir est produit par gazéification du charbon, un procédé thermochimique transformant le charbon en gaz de synthèse (syngas), composé principalement d'hydrogène (H_2) et de monoxyde de carbone (CO) (Panić et al., 2022).

2.5.6 Hydrogène Brun

Procédés de Production : L'hydrogène brun est produit à partir de lignite, une forme de charbon brun de moindre qualité énergétique, par gazéification (Panić et al., 2022).

2.5.7 Hydrogène Blanc

Procédés de Production : L'hydrogène blanc, ou hydrogène naturel, est présent sous forme de gisements souterrains. Il n'est pas produit mais extrait, généralement par des techniques de forage (Panić et al., 2022).

2.5.8 Hydrogène Jaune

Procédés de Production : L'hydrogène jaune est produit par électrolyse de l'eau, en utilisant exclusivement l'énergie solaire comme source d'électricité (Panić et al., 2022).

2.6 Applications de l'hydrogène dans le monde maritime actuel et dans d'autres secteurs

Diverses applications de l'hydrogène comme mode de propulsion existent dans le monde maritime et dans d'autres secteurs comme le secteur automobile et aéroporté. Ce qui montre un intérêt pour ce carburant qui dans le futur pourrait se développer et devenir un acteur majeur du monde maritime. Une attention à son utilisation est donc nécessaire pour éviter tout accident qui pourrait créer de l'insécurité d'utilisation pour le personnel naviguant.

Dans le monde maritime, par exemple, nous avons des projets déjà réalisés et en cours de développement comme :

Le projet JAMILA (figure 5) est conçu autour de quatre grands réservoirs d'hydrogène liquide d'une capacité totale d'environ 280 000 m³. Le navire utilise les gazs d'évaporation pour la propulsion lors du trajet en charge. Le bateau mesure 370 m de long, 75 m de large et a un tirant d'eau de 10,012 m à pleine charge. Son déplacement en charge atteint 232 000 tonnes, lui permettant de transporter 20 000 tonnes d'hydrogène. Son système de propulsion comprend une turbine à gaz à cycle combiné d'environ 50 MW. Le volume de la cargaison d'hydrogène, pressurisée à 5 bar, détermine principalement la taille et le déplacement du navire. (Alkhaledi et al., 2022). C'est en projet pour le moment. Ce genre de navire correspond à un LNG ou un LPG.

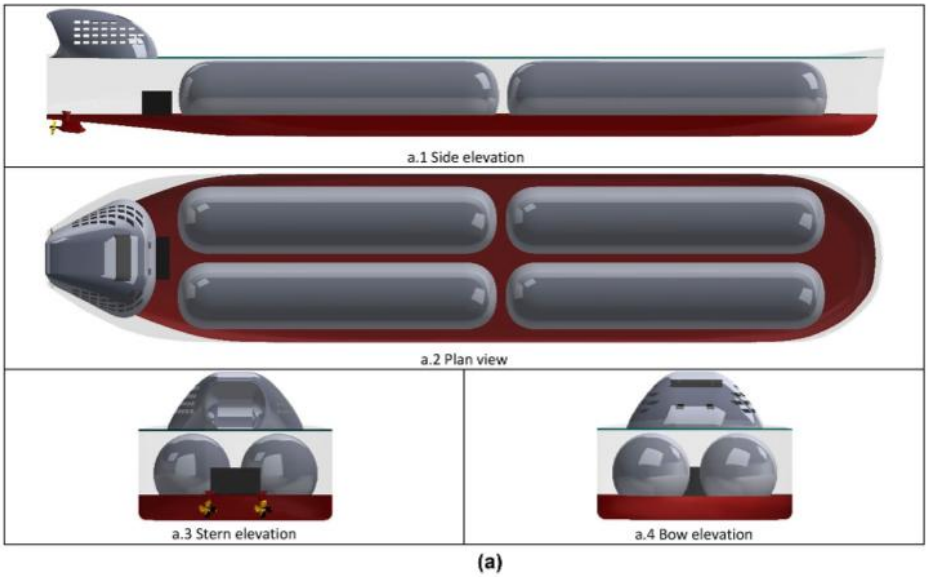


Figure 5: projet JAMILA un LH_2 carrier

Source :(Alkhaledi et al., 2022)

Dans ce qui est en fonction actuellement dans plusieurs navires, prenons ici l'exemple d'un constructeur belge CMB.tech, qui a déjà produit plusieurs CTV (figure 7) à propulsion dual fuel hydrogène-diesel. Un remorqueur du nom d'Hydrotug (figure 8) qui se situe ici à Anvers. Exemple aussi d'un petit transporteur à passagers du nom d'Hydroville et de l'Hydrobingo (figure 6) au Japon. Ces navires sont aussi des dual fuel hydrogène-diesel. (CMB.TECH, s. d.)



Figure 6: navire Hydrobingo par CMB.TECH

Source :(CMB.TECH, s. d.)



Figure 7: navire Hydrocat 55 par CMB.TECH

Source :(CMB.TECH, s. d.)

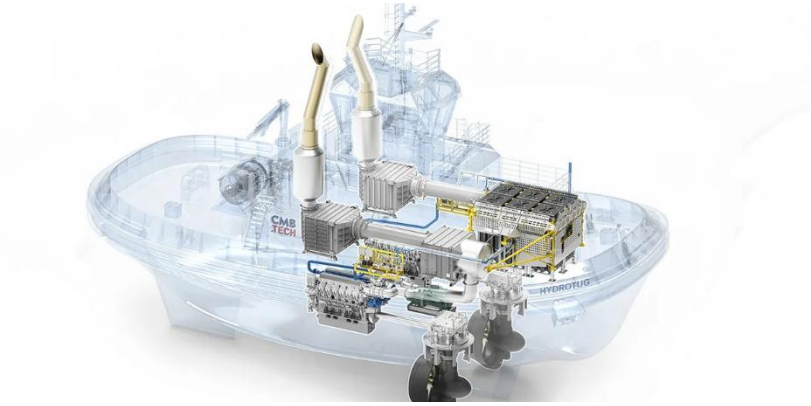


Figure 8: navire Hydrotug par CMB.TECH

Source :(Mandra J., 2023)

Dans le secteur fluvial, nous avons aussi comme exemple le ZULU06 (figure 9) de la compagnie Sogestran en France qui lui est propulsé grâce à deux piles à combustible de 200 kW chacune. Le ZULU06 est alimenté par 300 kg d'hydrogène vert qui lui confèrent une autonomie de +-500 km (France Hydrogène, 2024).



Figure 9: navire fluvial ZULU06 par Sogestran

Source : (Baird Maritime, 2024)

L'hydrogène est aussi présent dans l'automobile et dans le transport routier. Nous avons des voitures à pile à combustible avec des réservoirs à hydrogène et des camions avec un système de dual fuel comme pour les navires hydrogène-diesel.

2.7 Risques pour la santé, l'environnement et les dangers de l'hydrogène

2.7.1 Propriétés et risques associés à l'hydrogène

L'hydrogène est l'élément le plus abondant et le plus léger de l'univers (Inal et al., 2022). Bien qu'il soit non toxique et non corrosif pour les matériaux contrairement à l'ammoniac, il présente des risques majeurs en raison de ses propriétés physiques et chimiques.

- Point de fusion : -259°C
- Point d'ébullition : -253°C
- Température d'auto-inflammation : entre 500°C et 571°C
- Limite inférieure d'explosivité (LEL) : 4 % en volume d'air
- Limite supérieure d'explosivité (UEL) : 75 % en volume d'air

Stabilité : Le produit est stable, mais doit être tenu à l'écart de toute source d'ignition ou de chaleur (International Maritime Organization, 2002).

2.7.2 Risque d'utilisation

L'hydrogène est un gaz extrêmement inflammable (catégorie 1), et ses mélanges avec l'air sont hautement explosifs. Il brûle avec une flamme invisible et peut remplacer l'air, entraînant un risque d'asphyxie. Sous forme liquéfiée, il est stocké à des températures cryogéniques, ce qui ajoute un risque lié à la manipulation (Inal et al., 2022).

Risques de l'hydrogène pour l'être humain :

- Feu : De nombreuses réactions peuvent provoquer un incendie ou une explosion avec pour conséquences possibles des brûlures ou la mort. En cas d'incendie, il est recommandé de couper l'alimentation si possible. Sinon, laisser brûler en extérieur ou éteindre avec de l'eau, de la poudre ou du CO_2 (SGMF, 2025).
- Voies d'exposition : L'hydrogène peut être absorbé par inhalation. Une concentration élevée dans l'air réduit la teneur en oxygène, provoquant des symptômes tels que maux de tête, vertiges, nausées, vomissements, somnolence, perte de connaissance, voire la mort. Une peau bleutée peut indiquer une asphyxie. Une concentration dangereuse peut être atteinte rapidement (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024). Aucun signe olfactif n'alerte de sa présence ; un détecteur de gaz spécifique est nécessaire (un détecteur classique de gaz inflammables n'est pas adapté) (SGMF, 2025) .
- Dangers physiques : L'hydrogène, plus léger que l'air, se mélange facilement à celui-ci, formant des mélanges explosifs. Les mélanges gaz/air sont explosifs, un mélange 2:1 d'hydrogène et d'oxygène est connu pour son explosion particulièrement violente (Jolly, 2026).
- Dangers chimiques : Il réagit violemment avec l'air, l'oxygène, les halogènes et les oxydants forts, provoquant des incendies ou des explosions. Les catalyseurs métalliques (platine, nickel) amplifient ces réactions (Jolly, 2026).
- Dangers cryogéniques : L'hydrogène stocké sous sa forme liquide (LH_2) comporte un risque de contact avec des matériaux à des températures extrêmement basses, pouvant causer de graves brûlures ou des gelures sur la peau (Cekerevac & Cekerevac, 2025).

Prendre ces précautions en prenant le taux d'oxygène avant d'entrer dans une pièce qui pourrait avoir été exposée à une fuite d'hydrogène.

Impact environnemental :

- ❖ Stabilité : L'hydrogène est naturellement présent dans l'atmosphère et se disperse rapidement dans les zones bien ventilées (Jolly, 2026).
- ❖ Effets sur les plantes et animaux : Aucun effet nuisible n'a été rapporté, sauf en cas de gel dû à une détente rapide du gaz (Van Hoecke et al., 2021).
- ❖ Effets sur la vie aquatique : Aucune preuve d'impact n'est actuellement disponible.

2.7.3 Utilisation comme carburant

Bien que l'hydrogène soit environnementalement efficace (le produit de sa combustion est de l'eau), son utilisation nécessite des matériaux résistants à de très basses températures et un niveau de sécurité élevé pour éviter les fuites ou explosions (Najjar, 2013). Cependant, cette technologie reste limitée aux courtes distances pour l'instant due à sa faible densité énergétique volumétrique (Xing et al., 2021).

3 Applicabilité du Code IGF à l'hydrogène comme carburant

3.1 Histoire

Depuis le 1er janvier 2017, le Code IGF (Code international de sécurité pour les navires utilisant des gaz ou d'autres carburants à bas point d'éclair) s'applique officiellement, accompagné d'ajustements majeurs dans la convention SOLAS. Ces modifications touchent principalement le chapitre II-1 du code IGF, qui traite de la construction, de la stabilité, des installations mécaniques et électriques des navires.

Parmi les évolutions notables (International Transport worker Federation, 2019) :

- La partie F, révisée pour encadrer les solutions alternatives en matière de conception et d'aménagement, notamment pour les systèmes de stockage et de distribution des carburants à faible point d'éclair.
- L'ajout d'une partie G, entièrement dédiée aux navires utilisant des carburants à bas point d'éclair. Cette section impose aux navires construits après l'entrée en vigueur du Code IGF de respecter ses exigences strictes.
- Des adaptations complémentaires dans le chapitre II-2 et l'appendice sur les certificats, afin d'assurer une cohérence globale avec les nouvelles règles.

3.2 But du code

Le Code international de sécurité pour les navires utilisant des gaz ou d'autres carburants à bas point d'éclair (Code IGF) a été élaboré pour établir une norme internationale applicable aux navires utilisant des carburants à bas point d'éclair, à l'exclusion de ceux déjà couverts par le Code IGC (Code international pour la construction et l'équipement des navires transportant des gaz liquéfiés en vrac) (International Maritime Organization, 2015).

Une grande partie des informations contenues dans ce code est similaire à celles du Code IGC, conçu pour les navires transportant des cargaisons à bas point d'éclair (International Maritime Organization, 2016a).

La philosophie fondamentale du Code IGF repose sur l'organisation, l'installation, le contrôle et la surveillance des machines, équipements et systèmes utilisant des carburants à bas point d'éclair, afin de minimiser les risques pour le navire, son équipage et l'environnement. Ce code aborde des domaines spécifiques nécessitant une attention particulière pour l'utilisation de ces carburants.

Conformément à l'approche fondée sur les objectifs de l'OMI (MSC.1/Circ.1394/Rev.2), le Code IGF définit des objectifs et des exigences fonctionnelles pour chaque section, servant de base à la conception, la construction et l'exploitation des navires. La version actuelle du code inclut des réglementations afin de répondre aux exigences fonctionnelles liées à l'utilisation du gaz naturel comme carburant (International Maritime Organization, 2015). Pourtant, le code ne prévoit pas pour le moment d'évolution pour des fuels tels que l'hydrogène, par exemple.

3.3 Évolution du Code IGF

Quelques modifications et améliorations ont été apportées au Code IGF. Le monde maritime évolue, notamment sur l'impact de notre industrie sur l'environnement et la pollution de notre planète.

Résolution MSC.391(95)(International Maritime Organization, 2015) : Adoption du Code IGF initial le 11 juin 2015. Entrée en vigueur le 1er janvier 2017.

Résolution MSC.422(98) (International Maritime Organization, 2015) : Amendement adopté en 2017 (notamment sur la sécurité incendie, chapitre 11). Entrée en vigueur le 1er janvier 2020.

Résolution MSC.524(106) (International Maritime Organization, 2015) : Amendement adopté le 10 novembre 2022. Entrée en vigueur le 1er janvier 2026. Cet amendement couvre la sélection des matériaux et la conception des tuyauteries, avec une révision complète de la Table 7.3. Cette table précise les types de matériaux autorisés (aciers au nickel, inox austénitiques, alliages d'aluminium, Fe-Ni et aciers à manganèse) ainsi que leurs températures de conception pouvant atteindre -165 °C**.**

Pour garantir la fiabilité, des essais obligatoires sont imposés : tests de résilience et une fréquence stricte d'échantillonnage. Des conditions particulières s'appliquent pour les épaisseurs supérieures à 25 mm et certains procédés comme le TMCP, qui nécessitent l'accord de l'Administration.

Résolution MSC.551(108) (International Maritime Organization, 2015): Amendement adopté le 23 mai 2024 (relatif aux exigences spécifiques pour les navires utilisant du gaz naturel, aux opérations de soutage et aux systèmes de confinement de carburant). Entrée en vigueur prévue le 1er janvier 2026. Il introduit des définitions précises et met à jour les exigences de conception,

notamment pour les réservoirs, les sas et la tuyauterie. Les systèmes de confinement et de décharge sont améliorés pour garantir le contrôle de la pression et de la température.

Les opérations de soutage sont sécurisées par des dispositifs de déconnexion à sec, des systèmes d'urgence et une évaluation documentée des risques. L'alimentation en combustible doit être redondante et automatiquement ventilée en cas d'arrêt, avec des tuyauteries en double enveloppe sous gaz inerte. Les règles de sécurité incendie et d'explosion sont renforcées, incluant la classification des zones dangereuses et l'obligation d'extincteurs spécifiques.

Enfin, le texte précise les types de jauges autorisées, la fréquence des essais de soudure et impose des procédures strictes avant le soutage. Ces mesures visent à garantir un haut niveau de sécurité pour la conception, la construction et l'exploitation des navires utilisant des gaz ou combustibles à faible point d'éclair.

Résolution MSC.567(109) (International Maritime Organization, 2015) : Amendement adopté le 6 décembre 2024. Entrée en vigueur prévue le 1er janvier 2028. Cette date charnière est définie selon trois critères : la signature du contrat de construction, le début de la construction (pose de la quille), ou la livraison du navire (avant 2032).

Sur le plan technique, l'amendement précise les règles de conception des navires, notamment pour les puits d'aspiration dans les réservoirs de carburant, qui peuvent désormais dépasser légèrement les distances minimales requises, sous conditions strictes de taille et de profondeur. La définition de la hauteur de référence (H**)** est également ajustée afin d'exclure ces puits d'aspiration des calculs de sécurité.

Le système de tuyauterie est renforcé : les soupapes de sûreté (PRV), pour les navires post-2028, doivent évacuer les gaz ou liquides soit vers les réservoirs (si la pression le permet), soit vers un mât de ventilation équipé d'un système de détection des liquides. Cela vise à éviter les accumulations dangereuses et à garantir une évacuation sécurisée. En matière de sécurité incendie, les exigences sont durcies pour les cloisons de classe A-60.

La prévention des explosions est un autre axe clé : les zones dangereuses (zone 1 et zone 2) sont redéfinies et élargies autour des équipements critiques (sorties de réservoirs, vannes, mâts de ventilation). Pour les navires post-2028, la zone 2 s'étend désormais à 4 mètres au-delà de la zone 1, avec la possibilité de réduire ces distances si une analyse de dispersion (basée sur 50 % du LEL) le justifie.

Enfin, la ventilation est encadrée plus strictement : les entrées d'air des espaces dangereux doivent provenir de zones non dangereuses, et les conduits traversant des zones à risque doivent être étanches aux gaz, avec des systèmes de surpression ou de dépression adaptés.

Ces modifications reflètent une volonté d'adapter le Code IGF aux nouvelles technologies et aux carburants alternatifs, en renforçant la sécurité des navires modernes face aux risques d'incendie et d'explosion.

On constate que le code évolue, mais pas assez vite pour tous les types de carburants. Sur le site de l'IMO, nous pouvons remarquer que l'organisation a quelques projets pour ces nouveaux carburants.

3.4 État actuel du Code IGF pour l'hydrogène dans les institutions compétentes

Le comité MSC (Maritime Safety Committee) a examiné des amendements au chapitre II-1 de la convention SOLAS afin de clarifier l'application du Code international de sécurité pour les navires utilisant des gaz ou d'autres carburants à point d'éclair bas (Code IGF). Les projets de révision du chapitre II-1 de la SOLAS et du Code IGF introduisent une nouvelle définition pour « carburant gazeux », en complément de la définition existante de « carburant à point d'éclair bas », et traitent les carburants gazeux de manière indépendante.

Ces amendements seront examinés plus en détail lors de la 111e session du Comité de la sécurité maritime (MSC 111), en vue de leur approbation et de leur adoption à la MSC 112 en 2026, avec une entrée en vigueur prévue pour le 1er juillet 2028.

Carburants alternatifs sur les transporteurs de gaz : la politique serait « un navire, un code ». Le comité MSC a discuté de la clarification du cadre réglementaire pour les transporteurs de gaz utilisant des carburants alternatifs, notamment pour déterminer si le Code IGF ou le Code IGC devait s'appliquer (International Maritime Organization, s. d.).

À l'issue de discussions approfondies sur une approche potentielle « un navire, un code », le comité MSC a convenu que :

- Les transporteurs de gaz utilisant des produits listés au chapitre 19 du Code IGC comme carburant relèveront des exigences du Code IGC ;

- Les transporteurs de gaz utilisant des carburants gazeux ou à point d'éclair bas autres que ceux listés au chapitre 19 du Code IGC comme carburant seront soumis **s**imultanément aux parties pertinentes du Code IGF et du Code IGC ;
- Cette application duale des deux codes devra être abordée par des lignes directrices à développer par l'OMI.

Le sous-comité CCC (Carriage of Cargoes and Containers) est chargé d'élaborer deux ensembles de lignes directrices :

1. Pour les produits listés au chapitre 19 du Code IGC, utilisés comme carburant.
2. Pour les carburants gazeux ou à point d'éclair bas autres que ceux listés au chapitre 19 du Code IGC, utilisés comme carburant.

Pourtant, l'hydrogène, que l'on considère ici comme un carburant alternatif qui devrait, en théorie, être régi par les codes IGF et IGC et qui s'apparente à un gaz liquéfié, n'est pas repris dans cette liste. On constate que, pour le moment, les institutions ne considèrent pas l'hydrogène comme une priorité en matière de sécurité et de praticité. Bien qu'il soit utilisé par certaines compagnies comme carburant (International Maritime Organization, s. d.) .

D'après le rapport de l'EMSA train-alter datant du 12/12/2024 (Houweling, Erstad, Kaspersen, Hoem, Giskegjerde, Strømsnes, 2024), à ce jour, il n'y a toujours pas de formation à proprement parler pour l'hydrogène. L'enquête confirme un peu ce que l'OMI dit : il y a peu de connaissances du secteur sur l'hydrogène en matière de carburant. À la question, est-ce que le code IGF est obsolète pour l'hydrogène ? Ce n'est pas tout à fait vrai, il y a quand même quelques similitudes avec le GNL.

Lors de l'étude, il a été constaté de manière générale qu'aucun des éléments existants du KUP (Knowledge, Understanding and Proficiency) de la convention STCW ne pouvait être considéré comme totalement obsolète. Deux raisons expliquent cela **:**

1. La plupart des carburants alternatifs ne sont pas encore pleinement intégrés dans l'industrie maritime : il faudra du temps avant que certaines compétences puissent être jugées obsolètes.
2. Même en utilisant des carburants alternatifs, des systèmes de carburant redondants ou des systèmes conventionnels de secours peuvent rester nécessaires **:** par exemple, les exigences concernant les groupes électrogènes de secours restent valables, ce qui

signifie que les connaissances sur les systèmes de carburant conventionnels conservent leur pertinence (Houweling, Erstad, Kaspersen, Hoem, Giskegjerde, Strømsnes, 2024).

En tant que carburant, l'hydrogène relève du Code IGF, et les exigences en matière de compétences peuvent en être déduites. Le stockage et le confinement de l'hydrogène présentent des similitudes avec le GNL (gaz naturel liquéfié). Les compétences et les KUPs identifiés se concentrent donc sur des compétences supplémentaires liées au système de carburant et au stockage, en tenant compte à la fois de l'hydrogène comprimé et de l'hydrogène liquide (Houweling, Erstad, Kaspersen, Hoem, Giskegjerde, Strømsnes, 2024).

D'après les différents rapports, pour créer un élément de formation sur l'hydrogène, nous devons faire la différenciation entre l'hydrogène liquide et l'hydrogène comprimé dans cet élément de formation. Les deux systèmes auront sûrement des similitudes, pour autant, leur différence devra être prise en compte.

4 Spécificités techniques et principes de protection : Adapter la sécurité maritime à l'hydrogène

À la suite des recherches effectuées pour les chapitres précédents, il est possible d'affirmer que l'hydrogène constitue un carburant qui nécessite une attention particulière en raison de ses propriétés. En effet, ce combustible requiert un niveau de sécurité élevé de la part du personnel naviguant.

Dans ce chapitre, nous allons mettre en avant les points essentiels de la sécurité qui, pendant la formation, joueront un rôle déterminant dans la mise en place d'une culture de sécurité pour le personnel naviguant à venir. Pour cela, nous pouvons nous appuyer sur les principes de sécurité pour le transport de gaz naturel, qui constituent les fondamentaux.

4.1 Principes de sécurité du code IGF pour le transport du gaz naturel

Le code IGF se base actuellement sur cinq grands principes de sécurité (figure 10) pour le GNL qui sont (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024) :

- La ségrégation
- L'intégrité du système
- La double barrière
- La détection des fuites
- L'isolement automatique des fuites

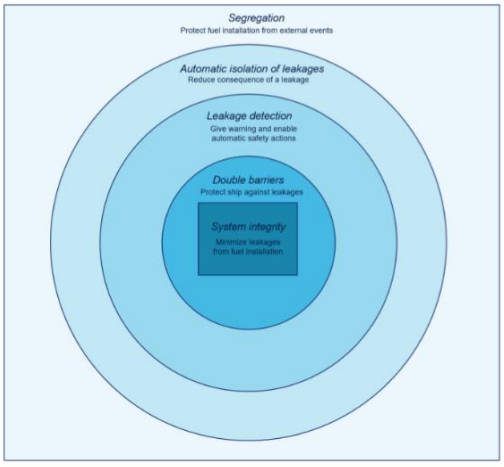


Figure 9-1 The safety concept of the current regulations in the IGF Code for natural gas fuel.

Figure 10: les cinq principes de sécurité pour le code IGF

Source :(Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024)

Dans le cadre d'un de ses rapports sur l'hydrogène, l'EMSA (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024) a mené une analyse approfondie de ces cinq points spécifiques :1) ségrégation, 2) intégrité du système, 3) double barrière,4) détection des fuites, 5) isolement automatique des fuites. Cette démarche méthodique permet de clarifier nos approches, bien que les résultats soient susceptibles d'évoluer au fil du temps.

Cette analyse nous permet d'identifier des éléments cruciaux pour établir une culture de sécurité optimale, tant pour le personnel naviguant que pour notre programme de formation.

4.1.1 Ségrégation

La ségrégation comme principe de sécurité du Code IGF, a pour but d'isoler les cuves de stockage de tout événement externe visant leur intégrité (accidents mécaniques, source de chaleur externe, …).

4.1.1.1 Ségrégation vis-à-vis des dommages mécaniques

Un dommage significatif infligé à une cuve de stockage de GNL constituerait un événement catastrophique que le navire n'est pas conçu pour supporter; cette observation s'applique également aux cuves de stockage de méthane liquéfié (CH_4) et d'hydrogène. Il est donc logique de présumer que les mesures de protection définies par le code IGF pour la sécurisation des cuves puissent être étendues à l'hydrogène utilisé comme carburant.

Si des exigences plus strictes concernant l'emplacement des cuves d'hydrogène s'avéraient nécessaires, il conviendrait de réévaluer les critères d'acceptation définissant la distance minimale par rapport à la coque, tels qu'ils sont établis dans la méthode probabiliste de localisation des cuves du code IGF (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024).

4.1.1.2 Ségrégation vis-à-vis des charges thermiques externes

De manière similaire à l'argument précédent sur la protection contre les dommages mécaniques, il est raisonnable de supposer que les réglementations du code IGF, conçues pour protéger les systèmes GNL des dommages liés au feu, soient également adaptées aux systèmes à hydrogène. Une exception doit cependant être faite pour les cuves composites.

L'utilisation pour l'hydrogène de cuves à haute pression en matériaux composites, couramment utilisées pour le stockage du CH_4 en raison de leur légèreté, nécessite une analyse approfondie de leur comportement en cas d'incendie afin de déterminer si les réglementations actuelles en matière de protection contre le feu, telles qu'énoncées dans le code IGF, offrent

une protection adéquate pour ce type de cuve. Par ailleurs, leur capacité à résister aux chocs et aux charges dynamiques doit être évaluée pour garantir leur adéquation dans un environnement où des charges accidentelles liées aux opérations de chargement et de navigation sont possibles (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024).

4.1.1.3 Zones dangereuses et maîtrise des sources d'inflammation

Compte tenu des différences majeures entre l'hydrogène et le méthane en termes de densité, d'inflammabilité et de réactivité, une prudence particulière s'impose lors de l'adaptation de l'approche du code IGF, initialement conçue pour le méthane, aux installations utilisant l'hydrogène comme carburant. Le code considère les espaces clos et mi-clos comme sûrs si les équipements qu'ils contiennent sont certifiés en conséquence.

Cependant, les mécanismes d'inflammation de l'hydrogène sont moins bien compris, sa plage d'inflammabilité est significativement plus large, et l'énergie requise pour enflammer un mélange hydrogène-air est d'un ordre de grandeur inférieur : 4-77 % pour l'hydrogène contre 5,3-17 % en volume dans l'air à celle nécessaire pour le méthane (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024; MarHySafe, 2021).

4.1.2 Intégrité du système

L'intégrité du système est un principe de sécurité fondamental du Code IGF visant à minimiser les risques de fuites par une conception technique rigoureuse et optimisée. Cette section analyse comment adapter ces standards pour garantir l'étanchéité des circuits face à la petite taille moléculaire et aux contraintes physiques uniques de ce carburant.

4.1.2.1 Exigences de conception pour réduire les risques de fuites

Les principes de conception adaptée et de minimisation des sources de fuites revêtent une importance particulière pour les systèmes à hydrogène. En raison de la petite taille des molécules d'hydrogène gazeux, les fuites, même minimes, sont fréquentes à titre d'exemple, il suffit de 220 g d'hydrogène dans un volume fermé de 80 m^3 pour obtenir un mélange explosif (MarHySafe, 2021; SGMF, 2025). Il est donc essentiel d'envisager des exigences strictes pour les sources de fuites dans les systèmes de canalisations d'hydrogène, en évitant les raccords détachables et en réduisant autant que possible le nombre de vannes et d'autres points potentiels de fuite.

L’hydrogène peut altérer de manière significative les propriétés mécaniques des métaux, un phénomène connu sous le nom de fragilisation par l’hydrogène (Lee et al., 2023). De nombreux métaux absorbent l’hydrogène, en particulier sous haute pression. L’absorption d’hydrogène par l’acier peut entraîner une fragilisation, conduisant à des défaillances des équipements. Le choix des matériaux pour les systèmes à hydrogène constitue donc un aspect crucial de la sécurité, nécessitant des exigences spécifiques (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024).

4.1.2.2 Contrôle des rejets opérationnels et d’urgence du système de carburant

Les rejets opérationnels émis par les cuves ne devraient pas constituer un facteur de risque pour l'hydrogène stocké sous pression. Toutefois, il convient de noter que les cuves de CH_4 sont fréquemment dotées de dispositifs de décharge de pression, activés par la température, visant à prévenir une augmentation de la pression résultant d'un incendie (Barelli et al., 2022). En cas d'activation de ces dispositifs, ceux-ci libèrent l'intégralité de l'hydrogène, générant ainsi un nuage gazeux de taille significative.

Étant donné la sensibilité à l’inflammation et la réactivité accrue de l’hydrogène, incluant une propension à la détonation, il est évident que les rejets d’hydrogène présentent un danger bien supérieur à celui du GNL. L’hydrogène liquéfié est stocké dans des cuves isolées sous vide à une température de -253 °C (Mekonnin et al., 2025). La différence extrême de température avec l’environnement ambiant et les volumes relativement réduits peuvent poser des défis en termes de durée de maintien, potentiellement à l’origine de rejets opérationnels depuis la cuve de stockage (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024).

4.1.3 Double barrière

Le principe de la double barrière vise à isoler systématiquement les fuites de combustible des sources d’inflammation afin de garantir la sécurité du navire. Cette section analyse l'adaptation nécessaire de ces enceintes secondaires, comme les espaces de connexion des cuves, pour confiner efficacement ce carburant.

4.1.3.1 Canalisations (piping)

Le principe de double barrière, appliqué aux systèmes GNL pour empêcher les fuites d’atteindre les sources d’inflammation, peut également être utilisé pour prévenir les fuites dans les canalisations d’hydrogène (SGMF, 2025). Toutefois, il est nécessaire d’étudier dans quelle

mesure la plus grande inflammabilité de l'hydrogène exigera des mesures de sécurité supplémentaires pour éviter l'inflammation dans les espaces annulaires des systèmes de canalisations à double paroi (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024).

4.1.3.2 Concept d'espace machine protégé par un système d'arrêt d'urgence (ESD)

Les premiers moteurs à gaz à quatre temps n'étaient pas disponibles avec un système de carburant à double barrière. Pour faciliter leur utilisation, le code IGF autorise l'emploi de systèmes de carburant sans double barrière, à condition que cela soit compensé par des exigences renforcées en matière de ventilation, d'aménagement de la salle des machines, de détection de gaz et d'arrêt automatique de l'alimentation en carburant (International Maritime Organization, 2015).

La philosophie sous-jacente repose sur l'idée que des taux de ventilation élevés, une détection précoce et l'isolement des fuites empêchent la formation de mélanges gazeux dépassant la limite inférieure d'explosivité. Cependant, en raison de l'inflammabilité extrême de l'hydrogène, le concept d'espace machine protégé par un système ESD n'est pas jugé adapté pour l'utilisation de l'hydrogène comme carburant (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024).

4.1.3.3 Espaces à double barrière (par exemple, espace de connexion des cuves, salle de préparation du carburant)

L'inflammabilité extrême de l'hydrogène nécessitera des barrières de sécurité supplémentaires pour permettre le stockage de l'hydrogène sous forme liquéfiée ou comprimée dans des espaces clos (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024).

4.1.3.4 Ventilation

Des analyses par dynamique des fluides (CFD) des rejets d'hydrogène dans des espaces clos indiquent qu'une salle maritime de taille typique (80 m^3) ne peut supporter une fuite totale inférieure à 220 g d'hydrogène pour une fuite de courte durée (en supposant une inflammation) (MarHySafe, 2021). Bien que la ventilation puisse être utilisée comme barrière de sécurité pour empêcher l'accumulation d'une atmosphère inflammable due à de petites fuites, elle ne saurait prévenir une inflammation ou un incendie par jet en cas de rejets plus importants.

Pour ces derniers, la ventilation forcée ne doit pas être considérée comme une barrière de sécurité fiable. Il est important de noter que la principale mesure de sécurité appliquée dans d'autres industries consiste à garantir que les fuites d'hydrogène se produisent à l'air libre, en exploitant sa flottabilité pour éloigner les fuites des zones à risque (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024).

4.1.3.5 Ouvertures d'accès entre zones dangereuses et non dangereuses

L'applicabilité des diverses exigences du code IGF concernant les dispositions d'accès sécurisé aux zones dangereuses, telles que les espaces de connexion des cuves, les salles de préparation du carburant et les enceintes des vannes à gaz, tout en empêchant la propagation des gaz vers les zones non dangereuses, nécessite une réflexion approfondie.

4.1.4 Détection des fuites

Un système permettant la détection des fuites, couplé à un mécanisme conçu pour interrompre le flux et ainsi réduire la quantité de carburant susceptible de s'échapper, sera tout aussi crucial pour les systèmes à hydrogène. Les seuils d'alarme des détecteurs et leur emplacement devront être ajustés en fonction des propriétés spécifiques de l'hydrogène (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024).

4.1.5 Isolement automatique des fuites

La fermeture automatique des vannes et d'autres actions de sécurité en cas de détection de fuites ou de perte de barrières de sécurité, afin de limiter les conséquences, est tout aussi importante pour l'hydrogène que pour le gaz naturel. Pour y parvenir, un système de sécurité dédié est indispensable (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024; SGMF, 2025).

4.2 Dangers d'utilisation de l'hydrogène à bord

En analysant les sources, cinq dangers majeurs sont mis en évidence : 1) une inflammabilité extrême, 2) un risque élevé de détonation, 3) des risques liés au stockage cryogénique, 4) un risque de fuite élevé et 5) un risque de fragilisation des métaux. Chacun de ces dangers est détaillé dans les sections suivantes avec ses caractéristiques distinctes.

4.2.1 Une inflammabilité et une sensibilité à l'allumage extrêmes

- Plage d'inflammabilité : L'hydrogène a une plage d'inflammabilité beaucoup plus large que le méthane (4-77 % contre 5,3-17 % en volume dans l'air). Cela signifie qu'une fuite

d'hydrogène a beaucoup plus de chances de former un mélange inflammable (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024).

- Énergie d'allumage minimale : L'énergie nécessaire pour enflammer l'hydrogène est environ 16 fois inférieure à celle du méthane (0,017 mJ contre 0,274 mJ) (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024). Des décharges électrostatiques invisibles ou de simples frottements peuvent suffire à l'allumer (SGMF, 2025).
- Auto-allumage spontané : Contrairement au GNL, l'hydrogène peut s'enflammer spontanément lors d'une libération soudaine à haute pression (phénomène de compression adiabatique ou effets électrostatiques) (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024).

4.2.2 Risque élevé de détonation

- Vitesse de combustion : La vitesse de flamme de l'hydrogène est environ 7 à 8 fois supérieure à celle du méthane (SGMF, 2025).
- Transition déflagration-détonation (DDT) : En cas d'explosion, cette vitesse élevée favorise une transition rapide vers une détonation, générant des ondes de choc massives (jusqu'à 20 bar, voire 50 bar avec réflexions) (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024). Une détonation est jugée crédible pour l'hydrogène dans des espaces confinés, alors qu'elle ne l'est pratiquement pas pour le GNL (SGMF, 2025).

4.2.3 Températures cryogéniques et condensation de l'air

- Froid extrême : L'hydrogène liquide (LH_2) est stocké à -253 °C, soit plus de 90 °C de moins que le GNL (-162 °C) (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024).
- Liquéfaction de l'air : À ces températures, l'oxygène et l'azote de l'air peuvent se liquéfier au contact des parois non isolées. Cette "air liquide" s'enrichit souvent en oxygène (l'oxygène se liquéfiant plus vite), ce qui augmente drastiquement l'inflammabilité des matériaux environnants et crée des risques d'explosion accrus (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024).
- Gel des systèmes : L'air peut geler (se solidifier) et obstruer les tuyauteries ou bloquer les soupapes de sécurité, un risque inexistant avec le GNL (SGMF, 2025).

4.2.4 Capacité de fuite et diffusion

- Petite taille moléculaire : Étant la plus petite molécule, l'hydrogène diffuse beaucoup plus rapidement et peut s'échapper par des orifices microscopiques là où le GNL resterait confiné (SGMF, 2025).

- Viscosité : Sa très faible viscosité entraîne un débit de fuite beaucoup plus élevé à travers les joints et les soudures défectueuses (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024).

4.2.5 Fragilisation des matériaux

- Fragilisation par l'hydrogène : L'hydrogène peut pénétrer la structure atomique des métaux (comme certains aciers à haute résistance), dégradant leurs propriétés mécaniques et provoquant des fissures ou des ruptures catastrophiques (SGMF, 2025). Le choix des matériaux est donc beaucoup plus restrictif que pour le GNL (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024).

Tous ces risques sont à prendre au sérieux pour notre formation, il faudra trouver des moyens de minimiser ces risques et d'informer le plus grand nombre d'utilisateurs de leur danger.

4.3 Analyse technique liée à l'hydrogène

Dans le cadre de l'analyse technique, il est possible d'identifier des spécificités qui ne sont pas communes au gaz naturel liquéfié (GNL). Ces spécificités comprennent notamment le type de réservoir utilisé pour l'hydrogène, qu'il soit comprimé ou liquéfié, les procédés d'inertage qui diffèrent, ainsi que certains phénomènes physiques qui ne se manifestent pas dans le contexte du GNL.

4.3.1 Typologie des réservoirs : LH_2 vs CH_2

L'hydrogène à bord peut être stocké sous deux formes principales, chacune imposant des contraintes techniques uniques :

- L'hydrogène liquide (LH_2) :

Pour le transport en vrac ou le stockage massif, on utilise des réservoirs à pression isolés sous vide, souvent de conception IMO type C (figure 11) (Johnsrud, Hammer, Leisner, Nakstad, 2025). Pression standard de stockage : elle est généralement maintenue en dessous de 10 bar. Contrairement au GNL, l'isolation doit être beaucoup plus performante : super-isolation par vide combinée à des multicouches pour maintenir une température de -253 °C et pour minimiser le "boil-off" (évaporation) (Mekonnin et al., 2025).

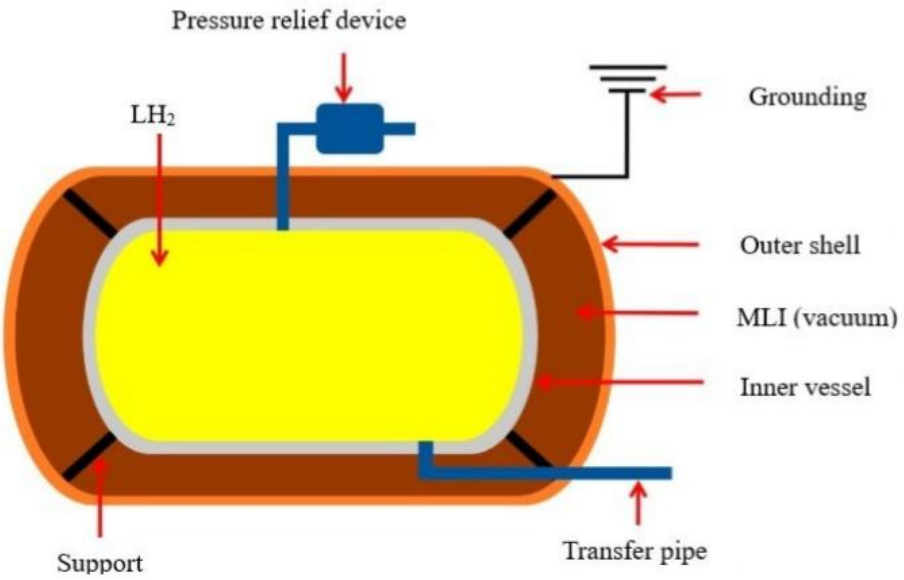


Figure 6. Structure of a liquid hydrogen storage tank. Reproduced with permission from ref. [79], Copyright (2024), MDPI.

Figure 11: schéma d'une cuve LH_2

Source :(Mekonnin et al., 2025)

❖ <u>L'hydrogène compressé (CH_2)</u> **:**

Pour les petits navires, le stockage sur le pont ou les unités interchangeables (swap containers), les réservoirs de type IV (figure 12) sont privilégiés. Ils sont constitués d'un liner non métallique (souvent polymère) enveloppé de fibres de carbone. Ils sont beaucoup plus légers que l'acier, mais plus sensibles à la chaleur et aux dommages mécaniques (impacts, UV). Ces réservoirs peuvent supporter des pressions allant jusqu'à 700 bar (Mekonnin et al., 2025).

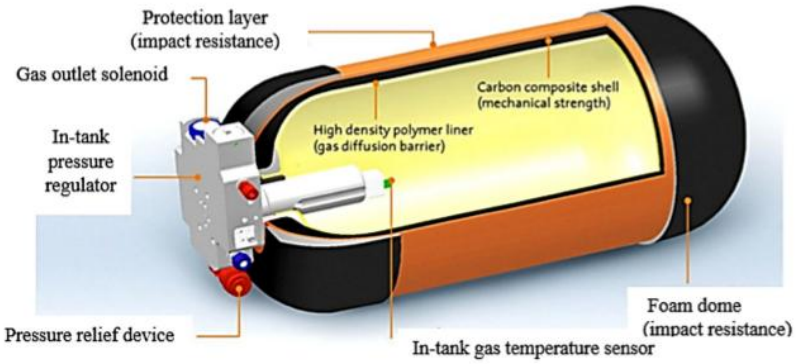


Figure 5. Type IV pressure vessel for compressed hydrogen storage. Reproduced with permission from ref. [71], Copyright (2007), Elsevier.

Figure 12: schéma d'un container de types IV pour le CH_2

Source :(Mekonnin et al., 2025)

- Dispositifs TPRD (Thermal Pressure Relief Device) : Cruciaux pour les réservoirs de type IV, ils évacuent le gaz de manière irréversible si une température critique (souvent 110 °C) est détectée lors d'un incendie, empêchant ainsi l'explosion du composite (Johnsrud, Hammer, Leisner, 2025a; Johnsrud, Hammer, Leisner, Nakstad, 2025).

- Type V **:** Entièrement composite sans liner. En cours de développement, ils visent des pressions dépassant 700 bar, pouvant atteindre 1000 bar (Mekonnin et al., 2025).

- Les enceintes de connexion (TCS/TCE) (figure 13) **:** Toute connexion de réservoir doit être placée dans un espace dédié (Tank Connection Space pour le LH_2 ou Enclosure pour le CH_2). Ces espaces servent de barrière secondaire critique pour contenir les fuites inévitables dues à la petite taille moléculaire de l'H_2 (Johnsrud, Hammer, Leisner, Nakstad, 2025).

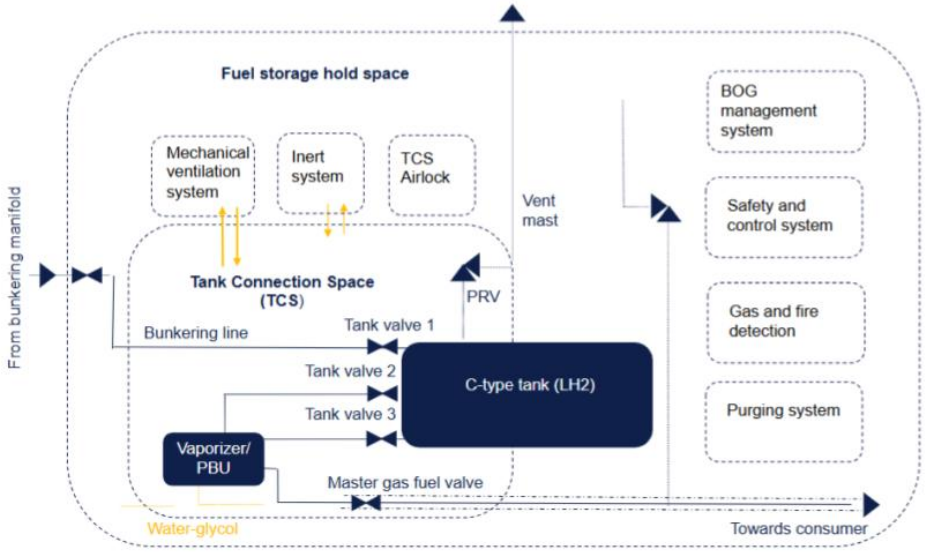


Figure 4-1 Flow diagram of the generic LH2 fuel system (Source: DNV).

Figure 13: diagramme d'un système d'hydrogène liquide comme carburant

Source :(Johnsrud, Hammer, Leisner, Nakstad, 2025)

Il faut être vigilant à certains dangers liés à la pression comme l'on peut le voir pour le CH_2 et LH_2, les pressions peuvent être élevées :

- Risque d'auto-allumage : La probabilité d'allumage spontané augmente de manière significative lors d'une libération soudaine dans les systèmes où la pression dépasse 30 bar (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024).
- Phénomène de piégeage : Si du LH_2 est piégé entre deux vannes et se réchauffe à température ambiante, la pression peut monter à plus de 850 bar, entraînant une rupture catastrophique des composants (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024).
- Mât d'évent : Pour les systèmes LH_2, le mât d'évent doit être conçu pour une pression de service d'au moins 20 bar afin de gérer les décharges d'urgence (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024).
- L'effet Joule-Thomson positif : Contrairement au GNL (méthane), l'hydrogène a un coefficient Joule-Thomson positif à des températures supérieures à -80°C. Cela signifie que lorsqu'il s'échappe d'un réservoir à haute pression (350-700 bar), l'hydrogène s'échauffe au lieu de se refroidir, ce qui peut faciliter son auto-inflammation (SGMF, 2025).

4.3.2 Choix des alliages pour la tuyauterie résistant à l'hydrogène

Dans la littérature scientifique et technique, ainsi que dans le code IGF, il est fait état de certains alliages qui pourraient être adaptés pour les tuyauteries et les réservoirs destinés à contenir du LH_2. Le choix des matériaux doit être effectué en tenant compte de leur résistance à la fragilisation par l'hydrogène et aux températures cryogéniques.

- Alliages d'aluminium :
  - *Alliage 5083-O* : utilisé pour les structures de réservoirs car il conserve son excellente ductilité à des températures cryogéniques (Alkhaledi et al., 2022).
  - *Alliage Al-Mg 5086* **:** spécifiquement mentionné pour les revêtements internes (liners) des réservoirs de LH_2 (Alkhaledi et al., 2022).
- Aciers inoxydables austénitiques (un type d'acier inoxydable caractérisé par une structure cristalline cubique à faces centrées (CFC) appelée austénite, obtenue par l'ajout de chrome (min. 17%) et de nickel (min. 7%)) :
  - *Séries 304, 304L, 316, 316L, 321 et 347* : recommandées pour les tuyauteries et les réservoirs jusqu'à -165°C (International Maritime Organization, 2015), et potentiellement plus bas après traitement spécifique. L'acier 316L est particulièrement apprécié pour sa résistance à la corrosion et à la fragilisation (Mekonnin et al., 2025).

- Aciers au nickel :
  - *Acier à 9% de nickel* : utilisé pour les barrières primaires et secondaires supportant des températures jusqu'à -165°C (Mekonnin et al., 2025).

4.3.3 L'inertage : le défi du gel et de l'hélium

Définition :

L'inertage consiste à remplacer l'air (contenant de l'oxygène) par un gaz inerte afin de maintenir la concentration d'oxygène en dessous de la concentration limite d'oxygène (Johnsrud, Hammer, Leisner, Nakstad, 2025).

- Concentration limite d'oxygène de l'hydrogène : Elle est d'environ 5 %, contre 11 à 15 % pour le GNL (Johnsrud, Hammer, Leisner, Nakstad, 2025).
- Implication **:** Le purgeage d'un système à hydrogène doit être beaucoup plus rigoureux et approfondi que pour les hydrocarbures classiques pour garantir qu'aucune combustion ne soit possible (Johnsrud, Skaret-Thoresen, Hammer, Leisner, 2024).

L'inertage est la barrière de sécurité primaire pour prévenir l'allumage. Pour l'hydrogène, le choix du gaz inerte est complexe :

- Le problème de l'azote (N_2) avec le LH_2 : Dans les systèmes GNL, l'azote est le gaz inerte standard. Cependant, avec le LH_2 à -253°C, l'azote gèle (point de solidification à -210°C). Si de l'azote est utilisé pour purger un circuit de LH_2, il peut se transformer en solide, boucher les tuyauteries ou bloquer les soupapes de sécurité (SGMF, 2025).
- L'hélium (He) comme solution : L'hélium est le seul gaz inerte qui reste gazeux à la température du LH_2. Il est donc impératif pour l'inertage direct des systèmes cryogéniques, malgré son coût élevé et sa rareté (SGMF, 2025).
- Stratégie alternative : Pour limiter la consommation d'hélium, on peut purger un circuit LH_2 avec de l'hydrogène gazeux "chaud" pour remonter la température au-dessus de -195 °C avant d'introduire de l'azote.
- Pour le CH_2 : L'azote reste utilisable car le système fonctionne à température ambiante, mais il doit être maintenu à une légère surpression par rapport à l'atmosphère pour empêcher toute intrusion d'oxygène (principe de l'atmosphère inerte constante) (Johnsrud, Hammer, Leisner, 2025a).

L'inertage est utilisé comme protection dans plusieurs zones critiques :

- Double paroi : Les tuyauteries en espaces clos doivent être protégées par une enceinte secondaire inertée sous pression constante (Johnsrud, Hammer, Leisner, Nakstad, 2025). Une chute de pression inerte indique une fuite de l'enceinte extérieure, tandis qu'une hausse indique une fuite du tuyau interne de combustible (Johnsrud, Hammer, Leisner, 2025a).
- Espaces de connexion des cuves (TCS) : Contrairement au GNL où la ventilation suffit, l'inertage constant des TCS est une alternative sérieuse pour éliminer tout risque d'explosion en cas de fuite (Johnsrud, Skaret-Thoresen, Hammer, Leisner, 2024).
- Salle des machines : Les gas valve units et les compresseurs devraient idéalement être placés dans des enceintes inertées sous azote pour prévenir toute inflammation spontanée (Johnsrud, Hammer, Leisner, Nakstad, 2025).

4.3.4 Gestion des fuites d'hydrogène

L'hydrogène est la plus petite et la plus légère de toutes les molécules, ce qui lui confère une diffusivité élevée et une très faible viscosité. Cela signifie qu'il peut s'échapper à travers des imperfections microscopiques dans les joints, les soudures ou les garnitures là où d'autres gaz resteraient confinés. Le risque est très élevé, il est impératif de s'attarder sur la prévention des fuites dans une formation dédiée.

Les sources identifient plusieurs vecteurs critiques de fuite :

- La perméation : L'hydrogène gazeux peut diffuser directement à travers les parois des matériaux, notamment les liners polymères des réservoirs de type IV (Johnsrud, Hammer, Leisner, Nakstad, 2025).
- La fragilisation : L'H_2 peut infiltrer le réseau métallique des aciers à haute résistance, provoquant des fissures ou des ruptures catastrophiques (SGMF, 2025).
- Les composants mécaniques : Les fuites proviennent généralement des vannes, des brides, des raccords filetés et des tuyaux flexibles utilisés pour le soutage (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024).
- Le phénomène de "cryo-pompage" : Pour l'hydrogène liquide (LH_2), toute fissure dans l'enceinte sous vide aspire l'air ambiant qui gèle au contact du froid, créant un cycle dangereux d'accumulation de glace et d'air enrichi en oxygène (SGMF, 2025).

Méthodes de détection :

La détection doit être continue et sans délai pour être efficace, car un nuage explosif d'hydrogène peut se former en seulement cinq secondes dans un espace semi-enclos (Johnsrud, Hammer, Leisner, Nakstad, 2025).

- Détection acoustique : C'est une innovation majeure recommandée pour le pont ouvert; ces détecteurs réagissent aux ultrasons émis par une fuite pressurisée, permettant une alerte avant même que le gaz n'atteigne un capteur chimique (Johnsrud, Skaret-Thoresen, Hammer, Leisner, 2024).
- Surveillance de l'enceinte secondaire : Les fuites sont détectées par des variations de pression dans l'espace annulaire des tuyauteries à double paroi (une hausse indique une fuite interne, une baisse signale une fuite externe) (Johnsrud, Hammer, Leisner, 2025a).
- Capteurs de gaz fixes : Placés aux points d'émission potentiels (brides, compresseurs, évents), ils déclenchent une alarme à 20% de la limite inférieure d'explosivité (LEL) et un arrêt d'urgence à 40% (International Maritime Organization, 2015). Mais ils semblent trop lents pour détecter efficacement (Johnsrud, Skaret-Thoresen, Hammer, Leisner, 2024).
- Vérifications opérationnelles : Des tests d'étanchéité doivent être réalisés avant chaque opération de soutage (bunkering) et après toute maintenance (Johnsrud, Hammer, Leisner, Nakstad, 2025).
- Technologies spécifiques : Les sources mentionnent des détecteurs électrochimiques, catalytiques, ou à infrarouge (IR), bien que certains types (comme les catalytiques) peuvent nécessiter de l'oxygène pour fonctionner, ce qui pose un problème dans les espaces inertés (Johnsrud, Skaret-Thoresen, Hammer, Leisner, 2024).

Pour réduire les risques, les sources préconisent une approche de « défense en profondeur » ou dite en multicouche :

- Intégrité du système : La priorité est de minimiser les connexions détachables en privilégiant le soudage (notamment le procédé TIG) pour toutes les tuyauteries de petit diamètre, même si cela représente un défi technique (SGMF, 2025).
- Double barrière (enceintes secondaires) : Toute tuyauterie d'hydrogène en espace clos doit être entourée d'une seconde enveloppe, soit sous vide pour le LH_2, soit inertée à l'azote pour l'H_2 gazeux (Johnsrud, Hammer, Leisner, Nakstad, 2025). L'utilisation de dispositifs de restriction de flux (RFO) ou de vannes d'excès de débit (EFV) permet de

limiter automatiquement la quantité de gaz libérée en cas de rupture franche d'une conduite (Johnsrud, Hammer, Leisner, 2025a).

4.3.5 Lutte incendie contre un feu d'hydrogène

La lutte contre les incendies d'hydrogène et leur détection exigent des protocoles radicalement différents de ceux utilisés pour le GNL ou les hydrocarbures classiques, en raison des propriétés physiques extrêmes de ce gaz.

4.3.5.1 Mesures pour combattre le feu d'hydrogène

La stratégie principale repose sur la gestion de la source du combustible plutôt que sur l'extinction directe de la flamme (SGMF, 2025).

- Isolement impératif de la source : La règle d'or est de ne jamais tenter d'éteindre un feu d'hydrogène tant que la fuite de gaz n'a pas été isolée. Si la flamme est éteinte alors que le gaz continue de s'échapper, un nuage explosif peut se former instantanément, entraînant un risque de détonation bien plus dangereux que l'incendie initial (Johnsrud, Hammer, Leisner, 2025a; SGMF, 2025).
- Utilisation de vannes ESD : En cas de détection d'incendie, le système de sécurité automatique (ESD) doit isoler immédiatement les sections du circuit pour limiter l'inventaire de gaz disponible (International Maritime Organization, 2015).
- Agents d'extinction spécifiques : Pour les feux d'hydrogène, on utilise principalement de la poudre chimique sèche ou du CO_2 (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024).
  - *Systèmes fixes* : Pour les zones critiques comme le poste de soutage (bunkering), il est précisé qu'un système fixe d'extinction à poudre chimique sèche doit être installé (Johnsrud, Hammer, Leisner, Nakstad, 2025).
  - *Mesure d'urgence portable* : En complément des systèmes fixes, au moins un extincteur portable à poudre sèche d'au moins 5 kg doit être placé à proximité du poste de soutage (Johnsrud, Hammer, Leisner, Nakstad, 2025).
- Refroidissement des structures : Étant donné qu'on laisse souvent la flamme brûler jusqu'à épuisement du gaz, des systèmes de balayage par eau (deluge) ou de pulvérisation d'eau sont activés pour refroidir les réservoirs et les structures adjacentes afin d'éviter une escalade thermique (comme un effet BLEVE) (SGMF, 2025).
- Protection thermique : Bien que la flamme d'hydrogène émette moins de chaleur rayonnante que le gaz naturel, sa température est très élevée; des écrans thermiques et des isolations passives sont donc nécessaires pour protéger les zones sensibles (Johnsrud, Hammer, Leisner, 2025a).

4.3.5.2 Systèmes de détection

L'hydrogène étant incolore, inodore et brûlant avec une flamme presque invisible à la lumière du jour, la détection technologique est la seule barrière fiable (SGMF, 2025).

- Détection de flamme (UV/IR) : Les détecteurs optiques conventionnels sont inefficaces. Il est impératif d'utiliser des capteurs ultra-violets (UV) ou infrarouges (IR) capables de "voir" le rayonnement spécifique des flammes d'hydrogène (SGMF, 2025).
- Détection acoustique (ultrasons) : Pour les zones de pont ouvert, les détecteurs acoustiques sont recommandés car ils réagissent au son d'une fuite sous haute pression de manière quasi instantanée, avant même que le gaz n'atteigne un capteur chimique (SGMF, 2025).
- Surveillance des enceintes secondaires : Dans les doubles parois ou les espaces de connexion (TCS), la détection repose souvent sur des analyseurs d'oxygène (pour détecter une perte d'inertage) ou des capteurs de pression différentielle (Johnsrud, Hammer, Leisner, 2025a).
- Dispositifs TPRD (Thermal Pressure Relief Device) : Les dispositifs de sécurité des réservoirs de type IV jouent un rôle capital en permettant l'évacuation irréversible du gaz dès qu'une température critique (généralement fixée à 110°C) est atteinte en cas d'incendie. Ce mécanisme prévient ainsi le risque d'explosion du composite (Johnsrud, Hammer, Leisner, 2025a; Johnsrud, Hammer, Leisner, Nakstad, 2025).

4.4 Protection contre les dangers de l'hydrogène

Bien que les équipements de protection individuelle (EPI) pour l'hydrogène partagent des similitudes avec ceux du GNL (notamment pour la protection cryogénique et ignifuge), l'hydrogène impose des exigences nettement plus strictes en raison de sa température extrême et de sa sensibilité exceptionnelle à l'inflammation.

4.4.1 Protection contre l'inflammation

Contrairement au GNL, l'hydrogène a une énergie d'allumage minimale, environ 10 à 16 fois inférieure à celle du méthane (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024).

- Vêtements antistatiques obligatoires : Pour l'hydrogène, le port de vêtements, de bottes et de gants certifiés antistatiques est une barrière de sécurité primaire. Une simple étincelle statique générée par le mouvement d'un vêtement non adapté peut suffire à enflammer une fuite d'hydrogène (SGMF, 2025).

- ❖ Flamme invisible : Les flammes d'hydrogène sont presque invisibles à la lumière du jour. Les EPI classiques ne suffisent pas à avertir le porteur d'un danger immédiat; la sécurité repose donc davantage sur des détecteurs portatifs individuels (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024; SGMF, 2025).

4.4.2 Protection cryogénique renforcée (LH_2)

Le GNL est stocké à -162°C, tandis que l'hydrogène liquide (LH_2) l'est à -253°C.

- ❖ Résistance au froid extrême : Les gants et tabliers cryogéniques utilisés pour le GNL ne sont pas nécessairement testés pour les températures proches du zéro absolu du LH_2. Les EPI doivent être spécifiquement évalués pour des températures de -240°C ou moins pour éviter des gelures instantanées en cas de contact direct ou de projection (Houweling, Erstad, Kaspersen, Hoem, Giskegjerde, Strømsnes, 2024).
- ❖ Matériaux non métalliques : De nombreux matériaux (joints, gants en polymère classique) deviennent extrêmement fragiles et cassants à la température de LH_2, ce qui nécessite des matériaux composites ou des polymères spéciaux pour maintenir l'intégrité de la protection (SGMF, 2025).

4.4.3 Risque d'enrichissement en oxygène

À -253°C, l'air ambiant se liquéfie au contact des parois froides. Cette "air liquide" est enrichie en oxygène, car l'oxygène se liquéfie à une température plus élevée que l'azote (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024).

- ❖ Compatibilité avec l'oxygène : Les vêtements de protection doivent être exempts de toute trace de graisse ou d'huile, car le contact entre des hydrocarbures et de l'air enrichi en oxygène peut provoquer une inflammation spontanée ou une explosion (SGMF, 2025).
- ❖ Inflammabilité des tissus : Des vêtements qui seraient normalement ignifuges peuvent brûler violemment dans une atmosphère enrichie en oxygène liquide (SGMF, 2025).

4.4.4 Protection respiratoire et faciale

- ❖ Appareils respiratoires isolants (SCBA) : Comme pour le GNL, ils sont indispensables en cas de fuite majeure afin de prévenir l'asphyxie (International Maritime Organization, 1974).
- ❖ Protection oculaire et faciale : Des écrans faciaux complets sont requis lors des opérations de soutage (bunkering) pour protéger contre les éclaboussures cryogéniques et les jets de gaz à haute pression (Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud, 2024).

5 Objectif de la recherche

Ce mémoire a pour but de développer une approche pédagogique structurée destinée à former le personnel naviguant à l'utilisation de l'hydrogène comme carburant maritime. L'aboutissement de cette recherche est la conception d'un cours suivant la méthode « Model Course Outline », approche structurée en huit étapes, allant de la définition du public cible à la planification détaillée du temps de formation qui représente la contribution principale de ce travail. Les analyses réalisées en amont sur les propriétés de l'hydrogène et les limites du Code IGF, les défis techniques et opérationnels définis dans les précédents chapitres servent de base technique et réglementaire à l'élaboration de ce programme.

L'objectif est de transformer des données scientifiques, techniques et réglementaires en un cursus opérationnel, permettant aux équipages d'acquérir les compétences nécessaires pour manipuler ce nouveau vecteur énergétique en toute sécurité. Ce mémoire propose ainsi une réponse concrète à l'absence actuelle de formation internationale harmonisée sur l'hydrogène, comme le souligne le rapport Trainalter (Houweling, Erstad, Kaspersen, Hoem, Giskegjerde, Strømsnes, 2024) de l'EMSA.

En structurant cette formation, l'ambition est de poser les bases d'un référentiel de compétences évolutif, capable de s'adapter aux futures réglementations de l'OMI, dont les mises à jour sont attendues vers 2028. Cette démarche vise à anticiper les besoins du secteur et à préparer les équipages aux défis techniques et réglementaires liés à l'adoption de l'hydrogène comme carburant maritime.

6 Model Course Outline method

La conception de ce cours ou de cette formation s'est articulée autour d'un modèle de planification structuré en huit étapes, inspiré de la méthode « Model Course Outline ». Cette approche, qui se présente sous la forme d'une feuille de route pour l'organisation de l'enseignement, a été mise en œuvre en suivant les directives fournies sur le site (Prima, 2026). Par la suite, cette méthodologie a été adaptée pour répondre aux besoins spécifiques de notre recherche.

6.1 Étape 1 : Définir notre audience

L'objectif de ce cours ou de cette formation est de former et/ou de mettre à jour le personnel naviguant, quel qu'il soit et quelle que soit son expérience, concernant ce carburant ou cette matière, sur les nouvelles technologies et méthodes d'utilisation de l'hydrogène comme carburant. Pour être admis, les candidats doivent détenir au minimum le certificat IGF avancé, avec, en complément, le tanker fire fighting et l'advance fire fighting certificate. Puisque la formation est spécialisée dans l'hydrogène, il est nécessaire d'avoir des connaissances de base en gaz de combustion. Les compétences requises sont répertoriées à l'annexe 1.

6.2 Étape 2 : Déterminer des objectifs d'apprentissage clairs

En plus des connaissances préalablement requises pour ce cours, des compétences supplémentaires en matière d'hydrogène sont nécessaires. On peut séparer en deux les compétences, le savoir et le savoir-faire.

6.2.1 Savoir

Dans le cadre de la partie « Savoir », les élèves devront démontrer leur capacité à comprendre et à appliquer :

1) Les principes de la thermodynamique et du comportement physique avancé

L'élève doit dépasser les bases pour comprendre les phénomènes complexes qui influencent la sécurité :

- L'effet Joule-Thomson positif **:** Contrairement au méthane, l'hydrogène s'échauffe lorsqu'il s'échappe d'un réservoir sous haute pression (si la température est supérieure à -80°C), ce qui facilite son auto-inflammation spontanée.
- Liquéfaction et enrichissement en oxygène **:** À -253°C (température du LH_2), l'air ambiant se liquéfie au contact des parois. Cet "air liquide" s'enrichit en oxygène (qui se

liquéfie plus vite que l'azote), créant un risque d'explosion accru au contact de matériaux normalement ignifuges.

- ❖ Isotopes et stabilité **:** Compréhension de la structure atomique (protium, deutérium, tritium) et de la forte liaison covalente qui explique sa stabilité à basse température mais sa réactivité violente dès qu'une source d'énergie (même minime) est présente.

2) La science des matériaux et l'intégrité du système

Le passage à l'hydrogène modifie radicalement les critères de sélection du Code IGF :

- ❖ La fragilisation par l'hydrogène (H_2) **:** Comprendre comment les molécules d'H_2 pénètrent la structure des métaux, provoquant des fissures catastrophiques dans des aciers qui seraient pourtant adaptés au GNL.
- ❖ Typologie des réservoirs de pointe **:**
  - ➢ Type C **:** Stockage liquide avec une super isolation sous vide pour minimiser le "boil-off".
  - ➢ Type IV **:** Réservoirs composites (fibres de carbone) pour la haute pression (700 bar), sensibles aux UV et aux chocs.
- ❖ Perméation **:** Savoir que l'hydrogène peut diffuser directement à travers les parois de certains polymères (liners des réservoirs type IV), ce qui nécessite une surveillance constante des espaces clos.

3) La philosophie de sécurité et analyse des risques (adaptation IGF)

L'élève doit comprendre pourquoi certaines flexibilités du Code IGF ne s'appliquent pas à l'hydrogène :

- ❖ Inadaptation de l'espace machine protégé par ESD : Pour le GNL, une simple barrière avec une ventilation élevée peut suffire, mais pour l'hydrogène, l'inflammabilité est telle que ce concept n'est plus jugé sûr. Une double barrière totale est requise.
- ❖ Transition déflagration-détonation (DDT) : Connaissance de la vitesse de flamme (7 à 8 fois celle du méthane) qui favorise des ondes de choc massives (jusqu'à 50 bar) en espace confiné, rendant les détonations "crédibles" contrairement au GNL.
- ❖ Phénomène de piégeage : Comprendre que si du LH_2 est emprisonné entre deux vannes, la pression peut monter à 850 bar en se réchauffant, entraînant une rupture immédiate.

4) La réglementation de l'OMI et les évolutions futures

Il est essentiel que l'élève prenne conscience de l'évolution constante des réglementations, qui ne sont nullement immobiles :

- Lignes directrices de l'OMI **:** Compréhension de l'approche "un navire, un code" et des discussions actuelles du comité MSC pour intégrer l'hydrogène de manière indépendante dans le Code IGF d'ici 2028.
- Zones dangereuses redéfinies **:** Étude des nouvelles distances de sécurité (zone 2 étendue à 4 mètres au-delà de la zone 1) pour les navires post-2028, basée sur des analyses de dispersion plus strictes.

5) La chimie de l'inertage et de la combustion

Il est fondamental que l'élève développe une compréhension approfondie des opérations d'inertage et de purge. Ces processus, qui s'inscrivent dans le cadre des techniques de stockage et de distribution de l'hydrogène, requièrent une rigueur méthodique et une expertise spécifique :

- La Concentration limite d'oxygène (CLO) **:** Savoir qu'elle est de 5% pour l'hydrogène (contre 11-15% pour le GNL), ce qui impose une purge bien plus rigoureuse.
- Propriétés de l'hélium **:** Comprendre pourquoi l'hélium est le seul gaz inerte utilisable avec le LH_2, car l'azote se solidifie à -210°C et boucherait les circuits.

6.2.2 Savoir-faire

Dans le cadre de la partie « Savoir-faire », les élèves devront démontrer leur capacité à comprendre et à appliquer :

1) La maîtrise des opérations de soutage et de transfert (Bunkering)

L'élève doit être capable de planifier et de surveiller un avitaillement en toute sécurité, qu'il s'agisse d'hydrogène comprimé (CH_2) ou liquide (LH_2).

- Gestion des procédures et listes de contrôle : Utiliser correctement les check-lists pour la mise en service ou hors service des réservoirs, tout en établissant des communications claires avec le terminal ou le navire ravitailleur.
- Calculs techniques : Effectuer des mesures et des calculs précis liés aux systèmes de carburant, notamment la détermination du ratio de remplissage et le calcul de la stabilité du navire à mesure que l'hydrogène est consommé. Ainsi que savoir faire la différence entre la limite de chargement (masse) et la limite de remplissage (volume). Cela diffère entre le LH_2 et le CH_2.

- ❖ Manipulation de conteneurs modulaires : Maîtriser les étapes spécifiques pour effectuer un changement sécurisé de conteneurs de stockage interchangeables.

2) La gestion de l'inertage et de l'atmosphère

Compte tenu de la température extrême de l'hydrogène liquide, l'inertage demande une compétence technique particulière pour éviter le gel des systèmes.

- ❖ Application de l'hélium : Appliquer l'hélium pour l'inertage direct des systèmes cryogéniques de LH_2, car l'azote se solidifierait à ces températures.
- ❖ Stratégies de purge : Réaliser des purges rigoureuses pour maintenir la concentration d'oxygène en dessous du seuil critique de 5%.
- ❖ Surveillance de la pression : Maintenir une surpression constante dans les systèmes pour empêcher toute intrusion d'air ou d'azote condensé.

3) La maîtrise des systèmes de détection et des protocoles de sécurité

L'élève doit acquérir une agilité opérationnelle face à des dangers souvent invisibles, en utilisant une combinaison de technologies acoustiques, optiques et de surveillance de pression.

- ❖ Détection acoustique et ultrasons :
  - ➢ *Reconnaissance auditive assistée* : Capacité à identifier et localiser les fuites d'hydrogène à haute pression qui, bien qu'invisibles et inaudibles pour l'oreille humaine, émettent des ultrasons détectables par des capteurs spécifiques.
  - ➢ *Réaction immédiate* : Savoir interpréter les alertes des détecteurs acoustiques (recommandés pour les ponts ouverts) qui réagissent quasi instantanément, souvent bien avant que le gaz n'atteigne un capteur chimique.
- ❖ Détection optique des flammes invisibles :
  - ➢ *Utilisation des caméras UV/IR* : Maîtriser les capteurs ultra-violets (UV) et infrarouges (IR) est indispensable pour "voir" le rayonnement spécifique des flammes d'hydrogène, celles-ci étant pratiquement invisibles à la lumière du jour.
  - ➢ *Limites des systèmes conventionnels* : Comprendre et vérifier que les détecteurs de flamme optiques standards ne sont pas utilisés, car ils sont inefficaces pour ce type de combustible.
- ❖ Surveillance des enceintes secondaires et barrières :
  - ➢ *Interprétation des pressions différentielles* : Surveiller les espaces annulaires des tuyauteries à double paroi : une hausse de pression indique une fuite du tuyau interne, tandis qu'une baisse indique une fuite de l'enveloppe externe.

- *Contrôle du vide (Type C)* : Capacité à détecter et réagir à une perte de vide dans les réservoirs d'hydrogène liquide, ce qui pourrait entraîner un réchauffement rapide et un dégazage d'urgence.
- *Analyseurs d'oxygène* : Surveiller les espaces de connexion des cuves (TCS) et les zones inertées pour détecter toute perte d'inertage (entrée d'air).

❖ Gestion des capteurs de gaz et alarmes :

- *Paramétrage des seuils LEL* : Savoir que les alarmes se déclenchent à 20 % de la limite inférieure d'explosivité (LEL) et que l'arrêt d'urgence (ESD) s'active automatiquement à 40 %.
- *Étalonnage* : Compétence pour étalonner et tester les instruments de mesure de gaz, tout en comprenant que certains capteurs catalytiques nécessitent de l'oxygène pour fonctionner et peuvent être inadaptés en milieu inerté.
- *Vitesse de réaction* : Agir en moins de 5 secondes, temps estimé pour la formation d'un nuage explosif dans un espace semi-enclos.

❖ Vérifications Opérationnelles et Tests :

- *Tests d'étanchéité systématiques* : Réaliser des contrôles rigoureux avant chaque opération de soutage (bunkering) et après toute intervention de maintenance.
- *Détection portative* : Utiliser des détecteurs individuels pour pallier l'absence de signes olfactifs et l'invisibilité des flammes lors des rondes de sécurité.
- *Dispositifs TPRD* : Surveiller l'intégrité des dispositifs de décharge thermique sur les réservoirs de type IV, capables d'évacuer le gaz de façon irréversible en cas de chaleur critique (110°C).

4) L'intervention d'urgence et de lutte contre l'incendie

La stratégie de lutte contre le feu d'hydrogène repose sur une règle d'or opérationnelle : la gestion de la source.

❖ Isolation de la source : Savoir couper immédiatement l'alimentation en carburant via les vannes d'arrêt d'urgence (ESD) avant toute tentative d'extinction de la flamme.

❖ Refroidissement structurel : Activer les systèmes de pulvérisation d'eau (déluge) pour refroidir les structures adjacentes et éviter une escalade thermique.

❖ Utilisation des agents spécifiques : Manœuvrer les systèmes fixes et portables d'extinction à poudre chimique sèche ou au CO_2.

5) L'utilisation des équipements de protection individuelle (EPI)

L'utilisation des EPI pour l'hydrogène exige une rigueur extrême pour éviter l'allumage par électricité statique.

- Prévention de l'électricité statique : Appliquer systématiquement les procédures de mise à la terre et porter des vêtements, bottes et gants certifiés antistatiques.
- Protection cryogénique : Utiliser correctement les EPI testés pour des températures de -240 °C afin d'éviter les gelures instantanées lors des opérations de LH_2.
- Hygiène de sécurité : Garantir que tous les vêtements de protection soient totalement exempts de graisse ou d'huile pour éviter toute inflammation spontanée en présence d'oxygène liquide.

6) L'évaluation et la gestion des risques

L'élève doit posséder un "état d'esprit proactif" concernant la sensibilisation aux risques.

- Analyse des risques : Élaborer et développer des analyses de risques spécifiques aux dangers de l'hydrogène (perméation, fragilisation, auto-allumage).
- Travail en espace clos : Appliquer les procédures de permis de travail et d'entrée sécurisée dans les zones où une fuite a pu se produire.

Une part substantielle de ces objectifs est sujette à des modifications, dans la mesure où les réglementations liées à l'hydrogène ne sont pas encore établies par les autorités compétentes. Néanmoins, il est possible, à l'heure actuelle, de prendre les devants et d'identifier les éléments essentiels.

6.3 Étape 3 : Compartimenter le cours en modules

Module 1 : Introduction et propriétés fondamentales de l'hydrogène

Ce module pose les bases théoriques sur l'hydrogène pur.

- Définition et structure **:** L'élément le plus léger et abondant, composé par les molécules diatomiques (H_2).
- Isotopes **:** Compréhension du protium (99,98 %), du deutérium et du tritium.
- Propriétés physiques **:** Densité 14,5 fois plus faible que l'air, grande capacité de diffusion à travers les métaux et comportement de gaz parfait.

- Propriétés chimiques **:** Stabilité thermique à basse température, liaisons covalentes fortes et potentiel d'ionisation élevé.

Module 2 : Production et classification

- Procédés industriels **:** Vaporeformage du méthane (SMR), gazéification de la biomasse et cycles thermochimiques (Iode-Soufre).
- Électrolyse de l'eau **:** Technologies alcalines (AEL), PEM et haute température (SOEC).
- Code des couleurs **:** Distinction entre l'hydrogène vert (renouvelable), gris (fossile), bleu (avec captage), noir/brun (charbon/lignite) et rose (nucléaire).

Module 3 : Cadre réglementaire et Code IGF

- Historique et but **:** Application du Code IGF pour les navires utilisant des carburants à bas point d'éclair.
- Évolutions (Résolutions MSC) **:** Analyse des amendements récents sur la sélection des matériaux (MSC.524) et la sécurité incendie (MSC.567).
- Politique "un navire, un code" **:** Clarification des rôles entre les codes IGF et IGC pour les transporteurs de gaz.

Module 4 : Dangers et risques pour la santé

- Inflammabilité extrême **:** Plage d'explosivité très large (4% à 75%) et énergie d'allumage 16 fois inférieure à celle du méthane.
- Risques physiques **:** Flamme invisible à la lumière du jour, risque d'asphyxie par déplacement d'oxygène et brûlures cryogéniques.
- Spécificités haute pression **:** Risque d'auto-allumage spontané lors d'une libération soudaine.

Module 5 : Conception technique et stockage (LH_2 vs CH_2)

- Typologie des réservoirs **:**
  - LH_2 (Liquide**) :** Réservoirs de type C isolés sous vide à -253°C.
  - CH_2 **(**Comprimé**) :** Réservoirs de type IV (composites) supportant jusqu'à 700 bar.
- Science des matériaux **:** Phénomène de fragilisation par l'hydrogène et sélection d'alliages résistants (inox 316L, aluminium 5083-O).
- Espaces de connexion (TCS) **:** Rôle des enceintes comme barrières secondaires.

Module 6 : Sécurité opérationnelle et inertage

- Le défi de l'hélium **:** Nécessité d'utiliser l'hélium (He) pour l'inertage des systèmes LH_2, car l'azote gèle à -210°C.
- Stratégies de purge **:** Maintenir la concentration limite d'oxygène (CLO) sous les 5%.
- Opérations de soutage (bunkering) : Procédures de déconnexion à sec, arrêt d'urgence (ESD) et gestion du "boil-off".

Module 7 : Détection et lutte contre l'incendie

- Stratégie d'extinction **:** Isoler la source impérativement avant d'éteindre la flamme pour éviter une détonation.
- Technologies de détection **:** Détecteurs de flamme UV/IR, détection acoustique par ultrasons pour les fuites haute pression et analyseurs d'oxygène.
- Agents extincteurs **:** Utilisation de poudre chimique sèche et/ou systèmes de refroidissement par eau (deluge).

Module 8 : Équipements de protection individuelle (EPI)

- Protection contre l'inflammation **:** Obligation de vêtements et bottes antistatiques.
- Protection cryogénique **:** Équipements testés pour des températures de -240°C ou moins.
- Hygiène de sécurité **:** Absence totale de graisse ou d'huile sur les tissus pour éviter l'inflammation spontanée en atmosphère enrichie en oxygène liquide.

Outre le premier et le second module, il est à prévoir que le contenu des autres modules subira des modifications au fil du temps, lorsque les réglementations seront instaurées et que l'industrie partagera ses retours d'expérience sur l'utilisation de l'hydrogène. À l'heure actuelle, un nombre restreint d'entreprises recourent à l'hydrogène ou, lorsqu'elles l'utilisent, ne partagent pas l'intégralité de leur expérience. Il s'avère donc ardu d'évaluer les difficultés pratiques réelles.

6.4 Étape 4 : Organiser les leçons pour chaque module

Dans le cadre de la conception pédagogique du programme, il est essentiel que chaque unité pédagogique soit convertie en leçons. Cependant, il est recommandé que la durée de chaque unité soit maintenue à un niveau court, afin d'optimiser l'efficacité de l'assimilation des connaissances. En cas de nécessité, il peut s'avérer pertinent de diviser une unité pédagogique qui s'avère trop longue en deux parties distinctes.

Le module un est pris comme exemple de contenu pour les instructeurs :

Module 1 : Introduction et propriétés fondamentales de l'hydrogène

1.1) Objectif : Comprendre la nature chimique de l'hydrogène et ses caractéristiques physiques élémentaires.

1.2) Définition et composition :

- *Nature* : L'hydrogène est un gaz inodore et incolore constitué par les molécules diatomiques (H_2). C'est l'élément le plus léger et le plus abondant de l'univers.
- *Isotopes* : On distingue trois formes atomiques :
  - Le protium : présent à plus de 99,98 %.
  - Le deutérium : environ 2 % dans la nature.
  - Le tritium : présent en infime quantité ou produit artificiellement.

1.3) Propriétés physiques clés :

- *Légèreté extrême* : L'hydrogène possède une densité très faible ; à titre de comparaison, l'air est 14,5 fois plus dense que lui.
- *Capacité de diffusion* : En raison de sa petite taille, il se diffuse facilement à travers les parois métalliques et s'échappe par les pores (effusion).
- *Températures cryogéniques* : Ses points de changement d'état sont extrêmement bas :
  - Point d'ébullition : - 252,8°C.
  - Point de fusion : - 259,2°C.

1.4) Propriétés chimiques et réactivité :

- Stabilité et amorçage : Sa molécule est thermiquement stable, ce qui explique sa faible réactivité à basse température. Pour déclencher une réaction, il faut généralement un apport de chaleur ou l'usage d'un catalyseur (comme le platine).
- Liaisons : Dans la plupart de ses composés, l'hydrogène forme des liaisons fortement covalentes.
- Combustion : Réagissant avec l'oxygène pour former de l'eau, l'hydrogène peut provoquer une violente explosion s'il est exposé à une étincelle électrique.
- Pouvoir réducteur : Sous sa forme active, c'est un agent réducteur puissant capable de transformer certains oxydes métalliques en métaux libres.

6.5 Étape 5 : Activités et matériel

Dans le cadre de cette étape, il s'avère essentiel de disposer d'un éventail diversifié d'outils et d'activités visant à consolider la théorie ou à corroborer certains principes de la théorie en facilitant la compréhension des étudiants. Il s'avère également impératif d'innover, notamment en tirant parti des avancées récentes dans le domaine des nouvelles technologies audiovisuelles, telles que la réalité virtuelle ou les capsules vidéo, qui, lorsqu'elles sont conçues de manière adéquate, se révèlent aisément compréhensibles.

La mise en place d'un partenariat avec une entreprise spécialisée dans la conception de simulateurs apparaît comme une nécessité incontournable pour la création de simulateurs permettant de reproduire des scénarios qui s'avèrent trop dangereux à mettre en œuvre dans des conditions réelles. Les supports classiques sont aussi importants que des slides explicatives et un cours mis sous forme de Word ou de PDF doit servir de référence pour les étudiants. Une excursion dans un institut de recherche sur l'hydrogène pourrait s'avérer pertinente pour appréhender les progrès et les innovations technologiques récents dans ce domaine.

Voici quelques propositions d'outils et de matériel qui seraient nécessaires pour ce cours :

1. Supports visuels et multimédia

- Comparaison visuelle : Vidéos montrant un feu d'hydrogène à l'œil nu (invisible) par rapport à une vue via des capteurs UV/IR, car les détecteurs conventionnels sont inefficaces.
- Modélisation des réservoirs : Schémas détaillés des réservoirs de type C (isolation sous vide multicouche pour le LH_2) et de type IV (liner polymère et fibre de carbone pour le CH_2).
- Schémas de production : Diagrammes des processus de vaporeformage (SMR) et d'électrolyse (PEM, alcaline) pour illustrer les "couleurs" de l'hydrogène.

2. Simulations et réalité virtuelle

- Détection acoustique : Exercice de localisation d'une fuite pressurisée à l'aide de détecteurs d'ultrasons, car ces fuites sont inaudibles pour l'homme.
- Arrêt d'urgence (ESD) : Simulation de réaction rapide (moins de 5 secondes) pour fermer les vannes d'isolement avant qu'un mélange inflammable ne dépasse le seuil critique.

- Gestion d'incendie : Scénario appliquant la "règle d'or" : ne jamais éteindre la flamme avant d'avoir isolé la source de carburant, sous peine de provoquer une détonation massive.

3. Ateliers pratiques et manipulations

Ces ateliers sont essentiels pour se rendre compte du danger que l'hydrogène peut produire sur le corps surtout du point de vue de la cryogénisation.

- Atelier EPI (Équipements de Protection Individuelle) :
  - Vérification de l'absence totale de graisse ou d'huile sur les vêtements pour éviter l'inflammation spontanée en atmosphère enrichie en oxygène liquide.
  - Test du caractère antistatique des vêtements et bottes, l'énergie d'allumage de l'hydrogène étant 16 fois inférieure à celle du méthane.
  - Démonstration de protection cryogénique spécifique pour des températures de -240°C.
- Défi de l'inertage **:** Exercice théorique ou pratique expliquant pourquoi l'hélium est le seul gaz utilisable pour purger les circuits de LH_2, alors que l'azote gèlerait à -210°C et boucherait les tuyauteries.

4. Calculs Techniques et Analyses

- Étude de FDS : Analyse comparative des Fiches de Données de Sécurité pour identifier la plage d'explosivité ultra-large (4% à 75%). Entre l'hydrogène et le méthanol par exemple.
- Scénario de "piégeage" : Calcul de la montée en pression d'un échantillon de LH_2 enfermé entre deux vannes, pouvant atteindre 850 bar en se réchauffant.
- Analyse de dispersion (CFD) : Utilisation de résultats de simulations pour comprendre comment 220g d'hydrogène peuvent saturer un local de 80m³ en cas de fuite.

5. Utilisation de la maquette miniature ou grandeur nature :

Il s'agit d'une représentation schématique d'un système de tuyauterie, plus précisément d'un circuit de carburant d'hydrogène. Cette représentation aurait pour objectif de mettre en lumière les risques associés à ce type de circuit et de faciliter leur compréhension en milieu sécurisé. Pour assurer plus de sécurité, un remplacement de l'hydrogène par l'azote liquide est possible. Les propriétés cryogéniques sont similaires.

- Surveillance de la double paroi : Utiliser votre système miniature pour montrer comment une fuite interne fait monter la pression dans l'enceinte secondaire, tandis qu'une fuite externe la fait baisser.
- Intégrité du système : Démonstration de l'importance des soudures (procédé TIG) pour contenir la plus petite molécule existante qui s'échappe par des pores microscopiques.

6. Partenariat avec des sociétés de simulateur :

En complémentarité avec le circuit physique qu'il soit miniature ou en grandeur nature, le simulateur permettrait de s'entraîner en toute sécurité. En effet, il est essentiel de pouvoir s'exercer dans un environnement où les risques sont réduits, ce qui permet d'éviter les conséquences potentiellement regrettables d'une erreur. De plus, il est important de noter que les scénarios peuvent varier en fonction des changements réglementaires et technologiques. Le simulateur permet de créer de nouveaux scénarios en fonction des retours sur le terrain que les entreprises ou les marins feront dans le futur.

- Exemples : Créer des environnements virtuels reproduisant le phénomène de cryo-pompage (enrichissement de l'air liquide en oxygène), de piégeage ou l'effet Joule-Thomson positif (auto-inflammation par échauffement lors d'une fuite haute pression).

6.6 Étape 6 : Évaluation des connaissances

Il incombe aux formateurs d'évaluer les compétences. Néanmoins, il serait pertinent de compléter cette évaluation par un examen écrit portant sur les connaissances théoriques. Concernant la partie simulateur, il serait souhaitable de préconiser une évaluation à la fin de la formation ou pendant les séances de travail, sur le sujet traité lors de chaque laboratoire. Enfin, pour la partie EPI et la manipulation du matériel de sécurité, il serait opportun d'envisager une évaluation permanente.

6.7 Étape 7 : Temps recommandé pour la formation

On pourrait envisager deux options pour cette formation :

La première est un cours conventionnel basé sur les critères ECTS. En nous basant sur le programme du cours Advanced Tanker Training Gas and IGF de l'Antwerp Maritime Academy, nous observons que les étudiants sont tenus de suivre 18 heures de cours théoriques et 18 heures

de cours pratiques. Ces dernières se composent exclusivement d'exercices sur simulateurs. Il conviendrait de rajouter quelques heures pour la partie de manipulation du matériel de sécurité.

La seconde proposition consiste à faire suivre la formation avancée pour l'IGF d'une durée de quatre jours dispensée par l'Antwerp Maritime Academy, à laquelle s'ajouteraient deux journées supplémentaires dédiées à la formation sur l'hydrogène : une première pour aborder les aspects théoriques, et une seconde pour couvrir la partie pratique. Cette extension vise à garantir que les candidats puissent assimiler l'ensemble des informations de manière optimale. Ces propositions restent toutefois susceptibles d'être ajustées en fonction des retours et des demandes spécifiques.

6.8 Étape 8 : Finaliser le cours avec une introduction et une conclusion

Pour cette partie, il n'est pas nécessaire de la développer ici puisque ce n'est pas l'objet de ma recherche.

7 Discussion

L'intégration de l'hydrogène comme vecteur énergétique au sein de l'industrie maritime s'inscrit dans une urgence climatique mondiale, imposant une transition vers des combustibles à faible empreinte carbone. Toutefois, cette mutation technologique soulève des interrogations profondes quant à la capacité du secteur à harmoniser l'innovation technique avec la sécurité opérationnelle et le cadre réglementaire. L'analyse des données met en lumière un décalage critique entre le rythme de l'innovation technologique et la lenteur de l'évolution du cadre réglementaire international basé sur le GNL. Les propriétés physiques uniques de l'hydrogène rendent certaines sections de la réglementation actuelle inadaptées.

Au-delà des défis purement techniques comme l'obligation d'utiliser de l'hélium pour l'inertage à la place de l'azote, cette discussion examinera la nécessité de réinventer une culture du risque. La dangerosité spécifique de l'hydrogène exige une approche opérationnelle radicalement différente de celle utilisée pour d'autres carburants alternatifs comme le méthanol. Enfin, le constat de l'EMSA concernant l'absence de formation spécifique harmonisée nous amène à discuter de la pertinence de créer un cadre pédagogique dédié.

7.1 Comparaison avec le méthanol

Il est intéressant de comparer l'approche pédagogique décrite dans ce mémoire avec la formation donnée à l'Antwerp Maritime Academy sur un autre carburant alternatif : le méthanol. Cours dont la table des matières est présentée en annexe.

La différence principale d'approche entre le méthanol et l'hydrogène est que le risque principal du méthanol est sa toxicité pour l'humain alors que le principal danger de l'hydrogène réside dans ses caractéristiques thermodynamiques et physiques telles que l'effet Joule-Thomson positif, sa haute inflammabilité et la petitesse de sa molécule.

Le méthanol nécessite des EPI axés sur la protection chimique, tandis que l'hydrogène exige des EPI pour le froid cryogénique (-253°C) et des propriétés antistatiques strictes, l'énergie d'inflammation de l'hydrogène étant seize fois inférieure à celle des autres combustibles.

Une autre différence majeure apparaît dans la gestion de l'atmosphère des réservoirs : Le programme du méthanol inclut le nettoyage et le conditionnement des cuves, des opérations relativement standards pour des cargaisons liquides. Alors que le stockage de l'hydrogène

introduit un défi technique absent du méthanol : l'utilisation impérative de l'hélium pour l'inertage. Là où l'azote suffit pour le méthanol, il gèlerait au contact de l'hydrogène liquide (LH_2), bouchant les tuyauteries. L'approche opérationnelle est radicalement différente.

Concernant la détection et la lutte contre l'incendie, les moyens de détection sont sensiblement les mêmes à une différence près : le remplacement du détecteur CO_2 pour le méthanol, par le détecteur acoustique par ultrasons (pour les fuites inaudibles) pour l'hydrogène, avec en commun les détecteurs de flamme invisible par caméra UV/IR.

En revanche, la lutte contre l'incendie est radicalement différente tant par la stratégie d'attaque que par les moyens mis en œuvre. Dans le cas du méthanol, la stratégie de lutte visera à éteindre l'incendie alors que celle de l'hydrogène visera à éteindre la source de la fuite en premier. Quant aux moyens mis en œuvre, pour le méthanol, on favorisera les mousses résistantes à l'alcool ainsi qu'une grande quantité d'eau (CM Energy, 2025) alors que pour l'hydrogène, on préconisera de la poudre sèche et un système de CO_2.

La compréhension de la fragilisation par l'hydrogène et l'étude des réservoirs de type IV (composites) et type C (cryogéniques) sont essentielles. Ces concepts sont quasiment inexistants dans la formation méthanol car les risques de perméation et de rupture moléculaire de l'acier y sont moindres et le méthanol est stocké à température ambiante.

7.2 Piste pour de futurs travaux

Il est clair que ce travail déblaye une partie de la problématique, mais quelle suite donner dans le futur, compte tenu de la vitesse d'évolution des réglementations ? Plusieurs pistes de réflexion apparaissent à la lumière de ce travail.

La gestion et le stockage des Équipements de Protection Individuelle (EPI) destinés à la lutte contre le feu pourraient soulever plusieurs questions. Parmi les pistes à explorer, on retrouve notamment les exigences liées à l'absence de traces de graisse ou de propriétés électrostatiques, qui amènent à s'interroger sur la nature de leur usage (unique ou réutilisable) ainsi que sur les protocoles de contrôle et de maintenance à appliquer. Leur conservation soulève également des interrogations quant aux infrastructures nécessaires, comme l'utilisation de caissons dédiés par exemple, dont l'efficacité et les spécificités techniques restent à préciser. Enfin, l'aspect humain ne peut être négligé : les procédures d'utilisation et la formation des intervenants apparaissent comme des éléments clés.

Le développement d'un simulateur avec des scénarios réalistes tels qu'une opération de soutage et de désoutage, un scénario sur le phénomène de cryopompage ou une situation de piégeage, etc. serait une piste importante à développer pour la complémentarité de cette formation.

La gestion du risque lié à la problématique du temps de réaction à un nuage explosif d'hydrogène inférieur à cinq secondes est une problématique majeure qui mérite une attention particulière. Il est humainement impossible de réagir dans ces délais sans automatisation. Il est important de réfléchir à la manière de gérer ce risque. Une réflexion sur la construction navale avec deux axes principaux à développer. Premièrement, la mise en place d'un système automatique de détection et de ventilation avec un renouvellement permanent de l'air dans la zone de stockage pour prévenir les incidents (on coupe à la source et on évacue l'hydrogène). Deuxièmement, une réflexion sur la conception de la salle des machines et de la zone de stockage du carburant quand la cuve est dans le navire, afin de préserver l'intégrité de la structure du navire en cas d'incendie ou d'explosion par exemple, une zone tampon déformable pour absorber l'onde de choc (une paroi sacrifiable/soupape de sécurité sur le deck permettant l'échappement du souffle de l'explosion).

8 Conclusion

Pour donner suite à l'évolution actuelle de la situation climatique mondiale, le secteur maritime est en recherche de solutions alternatives aux carburants carbonés conventionnels. Une de ces solutions est l'utilisation de l'hydrogène comme carburant qui a comme avantage de n'émettre que de l'eau comme produit résiduel mais qui présente d'énormes contraintes tant au niveau de la production qu'au niveau opérationnel.

Après avoir établi un état des lieux de la filière hydrogène dans ses dimensions physiques, chimiques, réglementaires, techniques et opérationnelles, nous visons, dans ce travail, d'une part à élaborer une approche pédagogique destinée à former le personnel naviguant à l'utilisation de l'hydrogène comme carburant, et d'autre part à évaluer la pertinence de créer un tel cours.

Il s'avère impératif de mettre en place un programme de formation relatif à ce carburant alternatif, en conformité avec les directives établies par l'EMSA. Actuellement, l'utilisation de ce carburant demeure marginale, et le manque de recul ainsi que de retours d'expériences industrielles constituent un facteur de risque significatif pour les utilisateurs. Le programme de formation a pour objectif de doter les opérateurs des compétences nécessaires pour appréhender les comportements spécifiques de l'hydrogène et ses particularités techniques.

Néanmoins, le travail effectué a mis en évidence qu'il reste des obstacles à la finalisation de ce cours pour qu'il remplisse les objectifs de formation à savoir : 1) la lenteur du développement des réglementations internationales dans la matière, 2) le peu d'intérêt des armateurs pour ce carburant et 3) l'absence de matériel pédagogique pratique, comme des simulateurs dont la mise en place nécessite des investissements financiers importants.

Il apparait qu'aujourd'hui seul un cours théorique est possible. Celui-ci devrait couvrir les aspects fondamentaux de l'hydrogène, ses principes opérationnels et les règles de sécurité qui s'y rapportent. Et ce cadre pédagogique est contraint par l'état d'avancement des solutions techniques et des réglementations en vigueur. Par conséquent, le contenu du cours selon mes analyses, est amené à évoluer régulièrement pour refléter les innovations et les mises à jour réglementaires.

En conclusion, ce travail jette les bases d'une formation du personnel naviguant aux dangers et aux spécificités de l'hydrogène afin de préparer un cours plus approfondi dès la mise en place du règlement, en théorie vers 2028. Néanmoins, comme indiqué précédemment, cette démarche devrait être complétée par le développement d'un simulateur et par un encouragement accru à la recherche fondamentale dans le domaine de la construction navale spécifique à l'hydrogène et à ses contraintes. Il serait également nécessaire de mener un travail dédié à la gestion, à la maintenance et à l'utilisation des équipements de protection individuelle pour la lutte contre l'incendie à bord d'un navire à propulsion hydrogène.

9 Bibliographie

Acar, C., & Dincer, I. (2018). 3.1 Hydrogen Production. *Comprehensive energy systems*, *3*, 1-40.

Alavi-Borazjani, S. A., Adeel, S., & Chkoniya, V. (2025). Hydrogen as a Sustainable Fuel : Transforming Maritime Logistics. *Energies*, *18*(5), 1231. https://doi.org/10.3390/en18051231

Ali, M., Isah, A., Yekeen, N., Hassanpouryouzband, A., Sarmadivaleh, M., Okoroafor, E. R., Al Kobaisi, M., Mahmoud, M., Vahrenkamp, V., & Hoteit, H. (2025). Recent progress in underground hydrogen storage. *Energy & Environmental Science*, *18*(12), 5740-5810. https://doi.org/10.1039/D4EE04564E

Alkhaledi, A. N., Sampath, S., & Pilidis, P. (2022). A hydrogen fuelled LH2 tanker ship design. *Ships and Offshore Structures*, *17*(7), 1555-1564. https://doi.org/10.1080/17445302.2021.1935626

Arcos, J. M. M., & Santos, D. M. F. (2023). The Hydrogen Color Spectrum : Techno-Economic Analysis of the Available Technologies for Hydrogen Production. *Gases*, *3*(1), 25-46. https://doi.org/10.3390/gases3010002

Atomic Energy and Alternative Energies Commission. (2021). Answer to the European consultation Renewable Energy Directive. *Novembre 2021*.

Baird Maritime. (2024, décembre 19). *VESSEL REVIEW | Zulu 06 – Hydrogen-powered cargo ship demonstrator designed for inland waters*. Baird Maritime. https://www.bairdmaritime.com/shipping/dry-cargo/vessel-review-zulu-06-hydrogen-powered-cargo-ship-demonstrator-designed-for-inland-waters

Barbarossa, V., Brutti, S., Diamanti, M., Sau, S., & Demaria, G. (2006). Catalytic thermal decomposition of sulphuric acid in sulphur–iodine cycle for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, *31*(7), 883-890. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.08.003

Barelli, L., Bidini, G., Perla, M., Pilo, F., & Trombetti, L. (2022). Boil-off gas emission from the fuel tank of a LNG powered truck. *Fuel*, *325*, 124954. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124954

Canadian Center for Occupational Health and Safety. (s. d.). Consulté 31 juillet 2023, à l'adresse https://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/whmis_ghs/pictograms.html

Cao, L., Yu, I. K. M., Xiong, X., Tsang, D. C. W., Zhang, S., Clark, J. H., Hu, C., Ng, Y. H., Shang, J., & Ok, Y. S. (2020). Biorenewable hydrogen production through biomass gasification : A review and future prospects. *Environmental Research*, *186*, 109547. https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109547

Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., & Stolten, D. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, *38*(12), 4901-4934. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151

Cekerevac, Z., & Cekerevac, D. (2025). Hydrogen Hazards, Risks, and Protection : An in-Depth Review. *MEST Journal*, *13*(SP), 23-48. https://doi.org/10.12709/mest.13.13.SP.02

CM Energy. (2025, septembre 8). *Methanol Handling Safety : Best Practices for Shipboard Operations—CM Energy*. CM Energy. https://www.cm-energy.com/knowledge/methanol-handling-safety-best-practices-for-shipboard-operations

CMB.TECH. (s. d.). *Port vessels*. CMB.TECH. Consulté https://cmb.tech/divisions/port-vessels

Deng, Z., Bai, M., Qi, M., Tian, Y., Qu, H., & Liu, Y. (2024). Inherent safety assessment of on-board methanol reforming hydrogen production fuel cell system considering jet fire and vapor cloud explosion. *International Journal of Hydrogen Energy*, *50*, 1047-1061. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.257

Dermirci & Miele. (2010, mai). Les méthodes de productions de l'hydroène sont-elles vertes? *l'actualité chimique*, 5-12.

Dewangan, K. K., Gopan, G., & Pattanayak, S. (2026). Overview of hydrogen production processes : Health and environmental impact. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, *45*(1), e70229. https://doi.org/10.1002/ep.70229

Feng, Y., Cao, J., Zhang, Y., & Jin, D. (2021). Safety Analysis and Risk Control of Shore-Based Bunkering Operations for Hydrogen Powered Ships. *World Electric Vehicle Journal*, *12*(4), 162. https://doi.org/10.3390/wevj12040162

Fontecave, M., Candel, S., & Poinsot, T. (2024). *L'hydrogène aujourd'hui et demain*. Académie des sciences. https://doi.org/10.62686/5

Foretich, A., Zaimes, G. G., Hawkins, T. R., & Newes, E. (2021). Challenges and opportunities for alternative fuels in the maritime sector. *Maritime Transport Research*, *2*, 100033. https://doi.org/10.1016/j.martra.2021.100033

France Hydrogène. (2014, novembre). *Production d'hydrogene a partir de la biomasse* [Memento]. https://www.france-hydrogene.org/technical-sheet/3-3-1-production-dhydrogene-a-partir-de-la-biomasse/

France Hydrogène. (2024, décembre 19). *Zulu 06 : Sogestran met en service le premier bateau fluvial français à l'hydrogène – France Hydrogène—France Hydrogène*. France Hydrogène. https://www.france-hydrogene.org/magazine/zulu-06%E2%80%AF-sogestran-met-en-service-le-premier-bateau-fluvial-francais-a-lhydrogene/?cn-reloaded=1

Gypen, L. A., Brabers, M., & Deruyttere, A. (1984). Corrosion resistance of tantalum base alloys. Elimination of hydrogen embrittlement in tantalum by substitutional alloying. *Materials and Corrosion*, *35*(2), 37-46. https://doi.org/10.1002/maco.19840350203

Hossain Bhuiyan, M. M., & Siddique, Z. (2025). Hydrogen as an alternative fuel : A comprehensive review of challenges and opportunities in production, storage, and

transportation. *International Journal of Hydrogen Energy*, *102*, 1026-1044. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.033

Houweling, Erstad, Kaspersen, Hoem, Giskegjerde, Strømsnes. (2024). *TRAINALTER final report study on the identification of specific competences for seafarers on ships using alternative fuels and energy systems* (p. 144). EMSA.

Hydrogène, propriétés chimiques, effets sur la santé et l'environnement. (s. d.). Lenntech. Consulté 24 février 2026, à l'adresse https://www.lenntech.fr/data-perio/h.htm

Inal, O. B., Zincir, B., & Deniz, C. (2022). Investigation on the decarbonization of shipping : An approach to hydrogen and ammonia. *International Journal of Hydrogen Energy*, S0360319922003937. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.189

International Chamber of Shipping. (2018). *Tanker Safety Guide Liquefied Gas* (Third Edition). Marisec.

International Maritime Organization. (s. d.). *Maritime Safety Committee (MSC)*. International Maritime Organisation. Consulté 25 février 2026, à l'adresse https://www.imo.org/en/mediacentre/meetingsummaries/pages/msc-default.aspx

International Maritime Organization. (1974). *International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS)*. IMO. As amended10/03/2026 via https://dmr.regs4ships.com/docs/international/imo/solas/index.cfm

International Maritime Organization. (1978). *International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers (STCW)*. IMO. As amended 10/03/2026 via https://dmr.regs4ships.com/docs/international/imo/stcw/2010/index.cfm

International Maritime Organization. (2002). *International Maritime Dangerous Goods Code* (2024e éd., Vol. 2). IMO. As amended10/03/2026 via https://dmr.regs4ships.com/docs/international/imo/imdg/2024/index.cfm

International Maritime Organization. (2010). *International Safety Management Code (ISM)* (2010e éd.). IMO. As amended 10/03/2026 via https://dmr.regs4ships.com/docs/international/imo/codes/ism/index.cfm

International Maritime Organization. (2015). *The international code of safety for ships using gases or other low-flashpoint fuels (IGF code)* (2024e éd.). IMO. As amended 10/03/2026 via https://dmr.regs4ships.com/docs/international/imo/codes/igf.cfm

International Maritime Organization. (2016a). *International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquified Gases in Bulk (IGC Code)*. IMO. As amended 10/03/2026 via https://dmr.regs4ships.com/docs/international/imo/codes/igc.cfm

International Maritime Organization. (2016b). *Medical First Aid Guide for Use in Accidents Involving Dangerous Goods (MFAG)* (Vol. 3). IMO. As amended 10/03/2026 via https://dmr.regs4ships.com/docs/international/imo/imdg/2024/mfag_contents.cfm

International Maritime Organization. (2019a). *Advanced training for masters, officers, ratings and other personnel on ships subject to the IGF code* (2019 edition). IMO International Maritime Organization.

International Maritime Organization. (2019b). *Basic training for masters, officers, ratings and other personnel on ships subject to the IGF Code* (2019 Edition). IMO International Maritime Organization.

International Transport worker Federation. (2019). *International code of safety for ships using gases or other low-flashpoint fuels (igf code)*.

Johnsrud, Hammer, Leisner. (2025a). *Risk analysis of generic hydrogen fuel systems study investigating the safety of hydrogen as fuel on ships deliverable d.3.2* (EMSA/OP/21/2023; p. 53). EMSA.

Johnsrud, Hammer, Leisner. (2025b). *Risk analysis of two specific ship types using hydrogen as fuel study investigating the safety of hydrogen as fuel on ships deliverable d.4* (EMSA/OP/21/2023; p. 51). EMSA.

Johnsrud, Hammer, Leisner, Nakstad. (2025). *Hazard identification of generic hydrogen fuel systems study investigating the safety of hydrogen as fuel on ships deliverable d.3.1* (EMSA/OP/21/2023; p. 65). EMSA.

Johnsrud, Skaret-Thoresen, Hammer, Leisner. (2024). *Reliability and safety analysis study invastigating the safety of hydrogen as fuel on ships by DNV* (EMSA/OP/21/2023; p. 81). EMSA.

Jolly, W. L. (2026). Hydrogen. In *Encyclopedia Brittanica*. https://www.britannica.com/science/hydrogen

Lee, H. W., Djukic, M. B., & Basaran, C. (2023). Modeling fatigue life and hydrogen embrittlement of bcc steel with unified mechanics theory. *International Journal of Hydrogen Energy*, *48*(54), 20773-20803. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.02.110

Lefèvre, V. (2025, septembre 27). *Hydrogène : Le guide pour décoder les couleurs ↘ Sirenergies*. Sirenergies. https://www.sirenergies.com/article/hydrogene-le-guide-pour-decoder-les-couleurs

Leisner, Hammer, Nakstad, Johnsrud. (2024). *Mapping safety risks for hydrogen-fuelled ships : Study investigating as fuel on ships* (EMSA/OP/21/2023; p. 82). EMSA.

Levere, T. H. (2026). Henry Cavendish. In *Encyclopedia Brittanica*. https://www.britannica.com/biography/Henry-Cavendish

Liu, T., Wang, X., Jiang, X., Deng, C., Niu, S., Mao, J., Zeng, W., Liu, M., & Liao, H. (2023). Mechanism of corrosion and sedimentation of nickel electrodes for alkaline water electrolysis. *Materials Chemistry and Physics*, *303*, 127806. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127806

Luo, H., Pan, Z., Yang, T., Chang, W., Zhang, D., Cheng, H., Li, X., & Raabe, D. (2025). A high-entropy alloy for superior resistance to biogenic sulfuric acid corrosion and

hydrogen embrittlement. *Matter*, *8*(3), 101944. https://doi.org/10.1016/j.matt.2024.101944

Mandra J. (2023, décembre 13). *World's 1st hydrogen-powered tug launched—Offshore Energy*. Offshore energy. https://www.offshore-energy.biz/worlds-1st-hydrogen-powered-tug-launched/

Mao, X., Ying, R., Yuan, Y., Li, F., & Shen, B. (2021). Simulation and analysis of hydrogen leakage and explosion behaviors in various compartments on a hydrogen fuel cell ship. *International Journal of Hydrogen Energy*, *46*(9), 6857-6872. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.158

MarHySafe. (2021). *Handbook for hydrogen-fuelled vessels* (1st Edition). DNV.

Maritime coastguard agency. (2019). *Code of Safe Working Practices for Merchant Seafarers* (2015 edition Amendment 4). Maritime Coastguard Agency.

Mekonnin, A. S., Wacławiak, K., Humayun, M., Zhang, S., & Ullah, H. (2025). Hydrogen Storage Technology, and Its Challenges : A Review. *Catalysts*, *15*(3), 260. https://doi.org/10.3390/catal15030260

Moretto, P., & Quong, S. (2022). Legal requirements, technical regulations, codes, and standards for hydrogen safety. In *Hydrogen Safety for Energy Applications* (p. 345-396). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820492-4.00003-8

Najjar, Y. S. H. (2013). Hydrogen safety : The road toward green technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, *38*(25), 10716-10728. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.05.126

Panić, I., Cuculić, A., & Ćelić, J. (2022). Color-Coded Hydrogen : Production and Storage in Maritime Sector. *Journal of Marine Science and Engineering*, *10*(12), 1995. https://doi.org/10.3390/jmse10121995

Peigat, L., Reytier, M., Ledrappier, F., & Besson, J. (2014). A leakage model to design seals for solid oxide fuel and electrolyser cell stacks. *International Journal of Hydrogen Energy*, *39*(13), 7109-7119. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.02.097

Prima. (2026, janvier 14). *How To Create A Course Outline In 8 Basic Steps [2026]*. Creator LMS. https://creatorlms.net/how-to-create-a-course-outline/

Rosa, L., & Mazzotti, M. (2022). Potential for hydrogen production from sustainable biomass with carbon capture and storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *157*, 112123. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112123

SGMF. (2025). *Hydrogen as a marine fuel an introduction* (version 2.0).

Sohal, M. S., O'Brien, J. E., Stoots, C. M., Sharma, V. I., Yildiz, B., & Virkar, A. (2012). Degradation Issues in Solid Oxide Cells During High Temperature Electrolysis. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, *9*(1), 011017. https://doi.org/10.1115/1.4003787

Song, H., Liu, Y., Bian, H., Shen, M., & Lin, X. (2022). Energy, environment, and economic analyses on a novel hydrogen production method by electrified steam methane reforming with renewable energy accommodation. *Energy Conversion and Management*, *258*, 115513. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115513

Stempien, J. P., Liu, Q., Ni, M., Sun, Q., & Chan, S. H. (2014). Physical principles for the calculation of equilibrium potential for co-electrolysis of steam and carbon dioxide in a Solid Oxide Electrolyzer Cell (SOEC). *Electrochimica Acta*, *147*, 490-497. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.09.144

Szablowski, L., Wojcik, M., & Dybinski, O. (2025). Review of steam methane reforming as a method of hydrogen production. *Energy*, *316*, 134540. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134540

Tofalos, C., Jeong, B., & Jang, H. (2020). Safety comparison analysis between LNG/LH $_2$ for bunkering operation. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, *4*(4), 135-150. https://doi.org/10.1080/25725084.2020.1840859

Tüysüz, H. (2024). Alkaline Water Electrolysis for Green Hydrogen Production. *Accounts of Chemical Research*, acs.accounts.3c00709. https://doi.org/10.1021/acs.accounts.3c00709

Usselman, M. C., & Rocke, A. j. (2026). Chemistry. In *Encyclopedia Brittanica*. https://www.britannica.com/science/chemistry

van Beurden P. (2004). *On the catalytic aspects of steam-methane reforming* (Literature Survey ECN-I--04-003; p. 27). https://publications.tno.nl/publication/34629708/L41g8p/i04003.pdf

van der Maas, T. (2020). *Assessment and comparison of alternative marine fuels*. Utrecht University.

Van Hoecke, L., Laffineur, L., Campe, R., Perreault, P., Verbruggen, S. W., & Lenaerts, S. (2021). Challenges in the use of hydrogen for maritime applications. *Energy & Environmental Science*, *14*(2), 815-843. https://doi.org/10.1039/D0EE01545H

Wallington, T. J., Woody, M., Lewis, G. M., Keoleian, G. A., Adler, E. J., Martins, J. R. R. A., & Collette, M. D. (2025). Hydrogen as a sustainable transportation fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *217*, 115725. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115725

Wei, S., Sacchi, R., Tukker, A., Suh, S., & Steubing, B. (2024). Future environmental impacts of global hydrogen production. *Energy & Environmental Science*, *17*(6), 2157-2172. https://doi.org/10.1039/D3EE03875K

Xing, H., Stuart, C., Spence, S., & Chen, H. (2021). Fuel Cell Power Systems for Maritime Applications : Progress and Perspectives. *Sustainability*, *13*(3), 1213. https://doi.org/10.3390/su13031213

You, Y.-W., Lee, D.-G., Yoon, K.-Y., Moon, D.-K., Kim, S. M., & Lee, C.-H. (2012). H2 PSA purifier for CO removal from hydrogen mixtures. *International Journal of*

Hydrogen Energy, *37*(23), 18175-18186.
https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.09.044

10 Annexes

10.1 Liste des compétences pour la formation IGF et trainalter de l'EMSA

Dans le cadre de la conception de cette formation, une référence aux modèles de cours de l'IMO 7.13 et 7.14 sera établie (International Maritime Organization, 2019b, 2019a). Ces derniers constituent les formations fondamentales et avancées pour le personnel naviguant sur les navires assujettis au code IGF. En outre, il est à noter que cette formation intègrera également des aspects relatifs au gaz naturel liquéfié (GNL). Comme il a été mentionné dans le chapitre précédent, l'EMSA et le SGMF préconisent de se référer à la formation prévue pour le GNL et d'adapter le code aux particularités de l'hydrogène (Houweling, Erstad, Kaspersen, Hoem, Giskegjerde, Strømsnes, 2024; SGMF, 2025).

Pour créer une base pour ce nouvel élément de formation, nous nous appuierons sur les thèmes de la formation IGF de base pour la formation fondamentale et avancée, qui seront nécessaires pour renforcer la compréhension et la technicité de l'hydrogène comme carburant. Cet élément de formation est destiné à être utilisé par le personnel naviguant, commandant, officier, A/B et autres personnels naviguant sur un navire soumis au code IGF.

Selon le modèle de cours 7.13 de l'IMO, les compétences requises pour la formation fondamentale sont les suivantes :

1.Contribuer à l'exploitation sûre d'un navire soumis au Code IGF :

- Connaissance et compréhension des concepts de conception et des caractéristiques opérationnelles des navires soumis au Code IGF.
- Connaissances de base sur les navires soumis au Code IGF, leurs systèmes de carburant et leurs systèmes de stockage de carburant.
- Connaissances de base sur les opérations des systèmes de carburant et de stockage à bord des navires soumis au Code IGF.
- Connaissances de base sur les propriétés physiques des carburants à bord des navires soumis au Code IG.
- Connaissance et compréhension des exigences de sécurité et de la gestion de la sécurité à bord des navires soumis au Code IGF.

2.Prendre des précautions pour prévenir les dangers à bord d'un navire soumis au Code IGF **:**

- Connaissances de base des dangers associés aux opérations sur les navires soumis au Code IGF.
- Connaissances de base des mesures de maîtrise des risques.
- Compréhension des caractéristiques des carburants à bord des navires soumis au Code IGF, telles qu'indiquées sur une Fiche de Données de Sécurité (FDS) (International Maritime Organization, 2019b).

3.Appliquer les précautions et mesures de santé et de sécurité au travail :

- Connaissance du fonctionnement des instruments de mesure de gaz et des équipements similaires.
- Utilisation correcte des équipements de sécurité spécialisés et des dispositifs de protection.
- Connaissances de base des pratiques et procédures de travail sécurisées, conformément à la législation, aux directives industrielles et à la sécurité personnelle à bord des navires soumis au Code IGF.
- Connaissances de base des premiers secours, en référence à une Fiche de Données de Sécurité (FDS) (International Maritime Organization, 2019b).

4.Conduire des opérations de lutte contre l'incendie à bord d'un navire soumis au Code IGF :

- Organisation de la lutte contre l'incendie et actions à entreprendre à bord des navires soumis au Code IGF.
- Dangers spécifiques liés aux systèmes de carburant et à la manipulation des carburants sur les navires soumis au Code IGF.
- Agents et méthodes d'extinction utilisés pour contrôler et éteindre les incendies en fonction des différents carburants présents à bord des navires soumis au Code IGF.
- Fonctionnement des systèmes de lutte contre l'incendie (International Maritime Organization, 2019b)**.**

5.Répondre aux situations d'urgence :

- Connaissances de base des procédures d'urgence, y compris l'arrêt d'urgence (ESD) (International Maritime Organization, 2019b).

6.Prendre des précautions pour prévenir la pollution de l'environnement due au rejet de carburants présents à bord des navires soumis au Code IGF :

- Connaissances de base des mesures à prendre en cas de fuite, de déversement ou de dégazage de carburants à bord des navires soumis au Code IGF (International Maritime Organization, 2019b).

Ces compétences sont essentielles pour garantir une culture de sécurité à bord optimale. Il est impératif que l'ensemble du personnel naviguant les ait pleinement intégrées afin d'éviter tout accident.

L'hydrogène, par ses propriétés chimiques et physiques, se présente comme un carburant technique. En plus de la formation fondamentale, il est impératif que le personnel naviguant suive la formation avancée du code IGF. Cette mesure permettra d'augmenter les couches de protection afin d'éviter tout accident, comme un cheese model.

Selon le modèle de cours 7.14 de l'IMO, les compétences requises pour la formation avancée sont les suivantes :

1.Connaissance des propriétés physiques et chimiques des carburants à bord des navires soumis au Code IGF **:**

- Connaissance et compréhension de base de la chimie et de la physique simples, ainsi que des définitions pertinentes liées à l'avitaillement et à l'utilisation sécurisés des carburants utilisés à bord des navires soumis au Code IGF.
- Compréhension des informations contenues dans une Fiche de Données de Sécurité (FDS) concernant les carburants visés par le Code IGF (International Maritime Organization, 2019a).

2. Utilisation des commandes liées aux carburants pour les installations de propulsion, les systèmes et services techniques, ainsi que les dispositifs de sécurité à bord des navires soumis au Code IGF :

- Principes de fonctionnement des installations de propulsion maritime.
- Machineries auxiliaires des navires.
- Connaissance des termes techniques maritimes (International Maritime Organization, 2019a).

3. Capacité à effectuer et à surveiller en toute sécurité toutes les opérations liées aux carburants utilisés à bord des navires soumis au Code IGF :

- Conception et caractéristiques des navires soumis au Code IGF.
- Connaissance de la conception des navires, des systèmes et des équipements présents à bord des navires soumis au Code IGF.
- Connaissance de la théorie et des caractéristiques des systèmes de carburant, y compris les types de pompes pour systèmes de carburant et leur utilisation sécurisée à bord des navires soumis au Code IGF.
- Connaissance des procédures et des listes de contrôle pour la mise en service et la mise hors service des réservoirs de carburant (International Maritime Organization, 2019a).

4. Planifier et surveiller un avitaillement, un arrimage et un arrêt sécurisés du carburant à bord des navires soumis au Code IGF :

- Connaissance générale des navires soumis au Code IGF.
- Capacité à utiliser toutes les données disponibles à bord concernant le ravitaillement, le stockage et l'arrêt des carburants visés par le Code IGF.
- Capacité à établir des communications claires et concises entre le navire et le terminal, le camion ou le navire ravitailleur.
- Connaissance des procédures de sécurité et d'urgence pour le fonctionnement des machines, des systèmes de carburant et de contrôle à bord des navires soumis au Code IGF.
- Maîtrise du fonctionnement des systèmes d'avitaillement à bord des navires soumis au Code IGF.
- Compétence pour effectuer des mesures et des calculs liés aux systèmes de carburant.

- Capacité à garantir une gestion sécurisée de l'avitaillement et des autres opérations liées aux carburants du Code IGF, en parallèle avec les autres opérations à bord, aussi bien au port qu'en mer (International Maritime Organization, 2019a).

5. Prendre des précautions pour éviter la pollution de l'environnement due au rejet de carburants des navires soumis au Code IGF :

- Connaissance des effets de la pollution sur l'humain et l'environnement.
- Connaissance des mesures à prendre en cas de déversement, de fuite ou de dégazage (International Maritime Organization, 2019a).

6. Surveiller et contrôler le respect des exigences législatives **:**

- Connaissance et compréhension des dispositions pertinentes de la convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires (MARPOL), telle que modifiée, et des autres instruments pertinents de l'OMI, des directives industrielles et des règlements portuaires couramment appliqués.
- Maîtrise de l'utilisation du Code IGF et des documents associés (International Maritime Organization, 2019a).

7. Prendre des précautions pour prévenir les dangers :

- Connaissance et compréhension des dangers et des mesures de contrôle associés aux opérations des systèmes de carburant à bord des navires soumis au Code IGF.
- Compétence pour étalonner et utiliser les systèmes de surveillance et de détection de gaz, les instruments et équipements à bord des navires soumis au Code IGF.
- Connaissance et compréhension des dangers liés au non-respect des règles et règlements pertinents.
- Connaissance et compréhension des méthodes d'analyse des risques à bord des navires soumis au Code IGF.
- Capacité à élaborer et développer des analyses de risques liées aux dangers à bord des navires soumis au Code IGF.
- Capacité à élaborer et développer des plans de sécurité et des instructions de sécurité pour les navires soumis au Code IGF.
- Connaissance des travaux à chaud, des espaces confinés et de l'entrée dans les citernes, y compris les procédures de permis (International Maritime Organization, 2019a).

8. Appliquer les précautions et mesures de santé et de sécurité professionnelles à bord d'un navire soumis au Code IGF :

- Utilisation appropriée des équipements de sécurité et des dispositifs de protection.
- Connaissance des pratiques et procédures de travail sécurisées, conformément à la législation, aux directives industrielles et à la sécurité personnelle à bord.
- Connaissance de base des premiers secours en référence à une Fiche de Données de Sécurité (FDS) pour les carburants visés par le Code IGF (International Maritime Organization, 2019a).

9. Connaissance de la prévention, du contrôle, de la lutte contre l'incendie et des systèmes d'extinction à bord des navires soumis au Code IGF :

- Connaissance des méthodes et des moyens de lutte contre l'incendie pour détecter, contrôler et éteindre les incendies de carburants visés par le Code IGF (International Maritime Organization, 2019a).

Ces compétences générales sont indispensables à la formation du personnel naviguant. Elles devront être adaptées pour tenir compte de l'utilisation de l'hydrogène. L'EMSA a d'ores et déjà éludé quelques pistes et points à adapter dans une formation (Houweling, Erstad, Kaspersen, Hoem, Giskegjerde, Strømsnes, 2024).

Les compétences et savoirs à connaître selon le rapport de l'EMSA sont :

1.Dangers intrinsèques de l'hydrogène en tant que carburant pour le personnel, parmi lesquels :

- Capacité de l'hydrogène à diffuser à travers les matériaux
- Propriétés corrosives de l'hydrogène
- Température extrêmement basse de l'hydrogène
- Large plage d'inflammabilité de l'hydrogène
- Seuil d'inflammation bas
- Point d'ébullition bas pour l'hydrogène cryogénique
- Température de stockage à froid de l'hydrogène

- Risque d'asphyxie
- Exposition de l'équipage à l'hydrogène cryogénique (liquide)
- Températures extrêmes sous zéro (Houweling, Erstad, Kaspersen, Hoem, Giskegjerde, Strømsnes, 2024).

2.Compétence en connaissance et compréhension des propriétés de l'hydrogène et des dangers pour la santé :

Connaissance :

- Des règles et réglementations pertinentes pour l'hydrogène.
- Des conditions extrêmes de l'hydrogène, c'est-à-dire température, pression, diffusion, inflammabilité.
- Du point éclair, la limite inférieure d'explosivité (LIE), la limite supérieure d'explosivité (LSE) et la température d'auto-inflammation de l'hydrogène.
- Des risques extrêmes de blessures en cas de contact avec des gaz sous zéro.
- De la diffusion rapide de l'hydrogène et ses conséquences potentielles (Houweling, Erstad, Kaspersen, Hoem, Giskegjerde, Strømsnes, 2024).

Compréhension :

- De l'hydrogène et de ses propriétés.
- De la fiche de données de sécurité (FDS) de l'hydrogène.
- De la différence entre l'hydrogène comprimé et l'hydrogène liquide (cryogénique).
- De la sensibilité de l'hydrogène à l'oxygène.
- De la haute inflammabilité de l'hydrogène.
- De la sensibilité de l'hydrogène à l'auto-inflammation (350-700 bar).
- Des exigences derrière les zones EX liées à l'hydrogène.
- Du fait que l'oxygène peut se condenser à partir de l'air avec le liquide et exposer à un risque (EPI cryogéniques -240°C).
- De l'hydrogène peut déplacer l'oxygène dans l'air et potentiellement causer une asphyxie.
- De ce qu'il ne faut pas faire en travaillant avec l'hydrogène comme carburant.
- Des risques d'entrer dans une zone où l'hydrogène pourrait avoir fui (Houweling, Erstad, Kaspersen, Hoem, Giskegjerde, Strømsnes, 2024)

Maîtrise :

- De l'utilisation sécurisée/application des EPI pour les risques liés à l'hydrogène.
- De l'application correcte des appareils respiratoires dans le cadre des EPI.
- De la capacité à réagir rapidement aux alarmes de détection de gaz.
- Du travail dans des espaces confinés.
- De la mise en œuvre d'un état d'esprit proactif concernant la sensibilisation aux risques liés à l'hydrogène (Houweling, Erstad, Kaspersen, Hoem, Giskegjerde, Strømsnes, 2024).

3.Compétence à prendre des précautions pour prévenir les risques d'inflammation, d'explosion et d'incendie d'hydrogène**.** Ainsi que les compétences à planifier, exécuter et surveiller le bunkering sécurisé de l'hydrogène, y compris les dangers d'incendie et d'explosion :

- Inflammabilité, à la fois comprimée et liquide
- Sources d'inflammation
- Risque d'explosion

Connaissance :

- Des risques liés à la rupture de confinement de l'hydrogène (l'azote ne peut pas être utilisé pour l'inertage car il se condensera).
- De la manière dont les matériaux composites utilisés dans les réservoirs d'hydrogène comprimé sont affectés lorsqu'ils sont exposés au feu et aux dommages mécaniques.
- Qu'une fuite à haute pression peut s'auto-enflammer.
- Du fait que les réservoirs d'hydrogène comprimé sont vulnérables (impact, feu, UV) en raison de leur fabrication en composites.
- De la densité de l'hydrogène peut changer extrêmement en fonction de la température (Houweling, Erstad, Kaspersen, Hoem, Giskegjerde, Strømsnes, 2024) .

Compréhension :

- Des différences et propriétés de l'hydrogène comprimé et liquide.
- De la prévention de l'intrusion d'air/azote dans le système d'hydrogène.
- Des procédures et risques pour les opérations de bunkering d'hydrogène.

- Du danger d'utiliser l'azote comme gaz inerte avec l'hydrogène liquide en raison de sa condensation.
- Du fonctionnement du système de détection de fuites d'hydrogène, y compris ses limites.
- De la manière dont l'électricité statique s'accumule et comment l'éviter en travaillant dans les zones Ex.
- De la limitation du mélange d'air avec l'hydrogène.
- De l'importance d'une ventilation adéquate dans les zones où l'hydrogène est traité ou stocké.
- De l'importance de l'isolation sous vide pour l'hydrogène liquide.
- Des dangers liés à la température et le fait que l'air se solidifie à des températures extrêmement froides liées à l'hydrogène liquide.
- De l'importance de la surpression dans le système d'hydrogène.
- Des conséquences de la perte de vide dans les réservoirs de type C.
- De l'importance que vous perdez la barrière de sécurité la plus importante lorsque l'inertage/vide est compromis.
- De l'importance du type de matériau pour les différents réservoirs de stockage d'hydrogène.
- Des conséquences des fuites.
- Des risques de rupture de confinement.
- Des effets de la contamination à l'intérieur des canalisations d'hydrogène liquide (d'air et d'azote condensés).
- Des risques de connexion et de déconnexion des conteneurs modulaires de stockage d'hydrogène interchangeables.
- Du fait de ne pas utiliser d'azote avec l'hydrogène liquide dans les canalisations à double paroi en raison du risque que l'azote fuie dans les canalisations d'hydrogène liquide.
- Que l'hydrogène liquide condense l'air autour des réservoirs en cas de fuite.
- Que la contamination de l'hydrogène liquide à l'intérieur des canalisations puisse se retrouver dans les réservoirs de carburant lors du bunkering d'hydrogène liquide, pouvant entraîner une atmosphère explosive si la température à l'intérieur du réservoir augmente.
- Des différences entre « vidé », « purgé » et « dégazé » (Houweling, Erstad, Kaspersen, Hoem, Giskegjerde, Strømsnes, 2024).

Maîtrise :

- De la capacité à reconnaître (entendre) les fuites d'hydrogène à haute pression, qui sont invisibles ;
- Des limites de remplissage, les limites de chargement et la différence entre celles-ci pour l'hydrogène liquide et comprimé.
- De la sensibilisation concernant le niveau de risque plus élevé en matière d'inflammation de l'hydrogène.
- De l'application de la mise à la terre et de la liaison pour prévenir l'électricité statique comme source potentielle d'inflammation.
- De la capacité à communiquer les risques et les procédures de sécurité pour un incendie d'hydrogène.
- De l'évacuation sécurisée en cas d'incendie/fuite d'hydrogène.
- Des étapes à suivre pour effectuer un changement de conteneur modulaire de stockage d'hydrogène interchangeable.
- De l'application de l'hélium pour l'inertage de l'hydrogène liquide (Houweling, Erstad, Kaspersen, Hoem, Giskegjerde, Strømsnes, 2024).

4.Compétence dans les aspects spécifiques à l'hydrogène liés à la planification de voyage **:**

Maîtrise :

- De l'application des réglementations liées à l'hydrogène pour chaque voyage individuel.
- Du type de permissions nécessaires pour certains voyages/escales lors de l'utilisation/du bunkering d'hydrogène.
- De la cartographie des possibilités de bunkering d'hydrogène.
- De l'estimation du carburant hydrogène requis et de la consommation pour un voyage.
- Du calcul de la stabilité du navire à mesure que l'hydrogène est consommé (Houweling, Erstad, Kaspersen, Hoem, Giskegjerde, Strømsnes, 2024).

5.Compétence dans le fonctionnement, l'exploitation et la surveillance corrects d'un moteur fonctionnant à l'hydrogène **:**

Connaissance :

- De la capacité de l'hydrogène à diffuser à travers les matériaux.

- Des risques liés aux systèmes de stockage à haute pression.
- Des propriétés de l'hydrogène (incolore, inodore, flamme invisible, etc.).
- Du risque d'auto-inflammation de l'hydrogène.
- Des machines spécifiques EX pour l'hydrogène.
- Des scénarios potentiels d'explosion d'hydrogène.
- Des dangers généraux et les risques d'explosion pour les navires fonctionnant à l'hydrogène (Houweling, Erstad, Kaspersen, Hoem, Giskegjerde, Strømsnes, 2024).

Compréhension **:**

- Du fonctionnement du système de carburant à hydrogène, les connexions du système et la prévention/détection des fuites.
- De l'importance des exigences de maintenance pour prévenir les fuites.
- De la facilité avec laquelle l'hydrogène peut fuir.
- Comment l'accumulation d'hydrogène se produit.
- De l'importance du type de matériau pour les différents réservoirs de stockage d'hydrogène.
- De l'efficacité des systèmes de ventilation.
- Du risque de présence d'hydrogène dans les gaz d'échappement.
- Des conséquences de l'intrusion d'hydrogène dans le carter du moteur (Houweling, Erstad, Kaspersen, Hoem, Giskegjerde, Strømsnes, 2024).

Maîtrise **:**

- Des équipements anciennement certifiés pour l'hydrogène (Houweling, Erstad, Kaspersen, Hoem, Giskegjerde, Strømsnes, 2024).

6.Compétence dans le fonctionnement et les procédures corrects des systèmes de sécurité à bord **:**

Connaissance **:**

- Du système de base de surveillance et de contrôle des processus liés à l'hydrogène.
- Du fait que la densité de l'hydrogène change extrêmement rapidement.

- Des propriétés de l'hydrogène à différentes températures.
- Des conséquences de la libération d'hydrogène exposée à l'oxygène (Houweling, Erstad, Kaspersen, Hoem, Giskegjerde, Strømsnes, 2024).

Compréhension **:**

- Des défis liés à la détection de l'hydrogène.
- Des effets de l'ESD (Emergency Shutdown Device) et son activation, y compris la redondance limitée après l'ESD.
- Du fonctionnement des transmetteurs de niveau/pression et de température sur le système de carburant à hydrogène/moteur.
- De la détermination du ratio de remplissage dans les navires à hydrogène.
- Des conséquences de la perte de pression de vide.
- Des conséquences de la perte de pression de gaz inerte (Houweling, Erstad, Kaspersen, Hoem, Giskegjerde, Strømsnes, 2024).

7.Compétence pour répondre aux urgences liées à l'hydrogène **:**

Connaissance **:**

- Des propriétés des feux d'hydrogène et le principe des « feux invisibles/micro-flammes ».
- Des effets des fuites d'hydrogène et qu'une fuite à haute pression peut s'auto-enflammer.
- Des vannes d'arrêt importantes pour le système d'alimentation en carburant, et comment les actionner en cas d'urgence.

Compréhension :

- De la conception du système d'arrêt d'urgence et les différents niveaux d'arrêt pour isoler des sources d'inflammation.
- Des principes derrière la première et la deuxième barrière pour les points de fuite.
- Comment une panne de courant affectera le système de sécurité et le concept de « fail safe ».
- De la différence entre les principes de lutte contre l'incendie conventionnel et ceux de la lutte contre l'incendie pour l'hydrogène comprimé ou liquide.

- Du but de la ventilation pour l'hydrogène et le principe de dilution.
- Du risque d'accumulation d'hydrogène au niveau du mât d'évent (Houweling, Erstad, Kaspersen, Hoem, Giskegjerde, Strømsnes, 2024).

Maîtrise **:**

- De la capacité à couper l'alimentation en carburant en cas d'incendie ou de fuite.
- De l'utilisation de divers types de systèmes et de méthodes de détection de fuites.
- De la réalisation de la réponse d'urgence selon le plan de réponse d'urgence (Houweling, Erstad, Kaspersen, Hoem, Giskegjerde, Strømsnes, 2024).

Il apparaît que nous disposons, dans le cadre de cette étude, d'un ensemble de compétences relativement complet, qui seront mises à profit dans le processus de conception d'un module de formation à destination du personnel naviguant.

10.2 Table des matières de la formation IGF spécialisée pour le méthanol de l'Antwerp Maritime Academy.

IGF: Methanol

Methanol as Low Flash Point Fuel

1 Introduction
1.1 Overview of IGF Code and low flashpoint fuels
1.2 Physical and chemical properties of Methanol
1.2 How to produce Methanol
1.3 Advantages and challenges of using Methanol
1.4 Significance of Methanol as marine fuel

2 Health and safety measures
2.1 Flammability
2.2 Health hazards and toxicity
2.3 Personal protective equipment (PPE) for Methanol
2.4 Safe handling practices for Methanol
2.5 Mitigating exposure risks (gas detection equipment)

3 Ship and equipment familiarization
3.1 Methanol fuel storage and handling systems
3.2 Engine types and modifications for methanol use
3.3 Methanol-specific auxiliary systems
3.4 Safety systems related to Methanol (ESD)

4 Specific operational considerations
4.1 Safe handling practices for Methanol
4.2 Bunkering operations: planning, documentation, and execution
4.3 Monitoring and operating methanol fuel systems
4.4 Maintenance and repairs on Methanol systems

4.5 Voyage planning with Methanol as fuel

4.6 Cleaning and conditioning of Methanol fuel tanks

5 Risk mitigation and emergency preparedness

5.1 Measures to reduce risks during operations

5.2 Emergency procedures for leakages, spillages, and releases

5.3 Fire prevention and firefighting techniques for Methanol

5.4 Enclosed space entry procedures and precautions

5.5 Drills and exercises

6 Regulatory framework

6.1 SOLAS and IGF Code requirements for alternative fuels

6.2 STCW Convention requirements

6.3 Safety management system (SMS) procedures

7 Fire safety and response

7.1 Fire detection and suppression systems

7.2 Firefighting strategies for Methanol fires

7.3 Post-incident response and recovery

8 Environmental considerations

8.1 Impact of Methanol spills and emissions

8.2 Measures to prevent environmental contamination

8.3 Regulatory compliance for environmental protection (MARPOL)