



Analyse des risques et évaluation de la sécurité pour le stockage d'hydrogène dans les trains

Risk analysis and safety assessment for hydrogen storage in the railway

FRICK Adrien
SERES-Technologies
Mérignac
africk@seres-technologies.com

JOUVENOT Gilles
OPmobility
Venette
gilles.jouvenot@opmobility.com

NYINA-MVONDO Eric
OPmobility
Venette
eric.nyina-
mvondo@opmobility.com

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31

Résumé — La transition écologique a accentué l'intérêt d'utiliser l'hydrogène comme vecteur énergétique, en particulier dans le domaine ferroviaire, où son utilisation est encore émergente. Le développement de systèmes de stockage d'hydrogène à bord des trains pose des défis techniques significatifs, notamment en raison des réglementations strictes qui régissent le secteur ferroviaire. L'absence de retour d'expérience de l'utilisation de ce vecteur énergétique dans le ferroviaire et l'existence encore limitée de standards l'encadrant représentent un défi supplémentaire pour en exploiter les avantages écologiques. Ce document décrit une approche stratégique visant à concilier les réglementations relatives à l'hydrogène (notamment Règlement UNECE No.134) avec la norme ferroviaire EN 50126. Le règlement UNECE No.134 détermine et liste les requis nécessaires pour garantir une intégration de l'hydrogène dans le domaine automobile (et adapté ici pour le ferroviaire), en maîtrisant les risques associés à l'exploitation de ce gaz. Face aux limites actuelles des standards existants sur l'hydrogène, cette approche se positionne comme une étape importante vers une adoption élargie de cette source d'énergie. Cette communication cherche à illustrer la double contrainte hydrogène et ferroviaire, par une étude de cas concret. Elle présente une approche méthodologique pour les acteurs de l'industrie, en offrant une suggestion type d'analyses de risques destinées à assurer un niveau de confiance suffisant dans la sécurité d'un système de stockage d'hydrogène.

Mots-Clefs — *Hydrogène, Sécurité ferroviaire, Stockage hydrogène, Standard, Méthodologie*

Abstract — The ecological transition has strengthened the interest in the use of hydrogen as an energy vector, especially in the railway sector, in which its use is still emerging. The development of hydrogen storage systems on trains raises significant technical challenges, including on account of strict regulations applying to the railway field. The lack of lessons learned regarding the use of this energy vector in the railway sector in addition to the still limited existence of standards regulating it represent an additional challenge in exploiting its ecological benefits. The present document describes a strategic approach aiming at conciliating the hydrogen related regulations (including regulation UNECE No.134) with the rail standard EN 50126. The regulation UNECE No.134 states and lists the requirements needed to guarantee an integration of hydrogen in automotive sector (here adapted to the railway field) while managing the risks related to the exploitation of this gas. Regarding the current limits of existing hydrogen standards, this approach represents an important step forward towards an enlarged adoption of this energy source. This paper aims at illustrating the double constraint of the hydrogen and the railway field, by a concrete case study. It introduces a methodological approach for industrial actors, offering a typical suggestion of risk analysis in order to insure a sufficient level of trust in the safety of a hydrogen storage system.

Keywords — *Hydrogen, Rail safety, Hydrogen storage, Standard, Methodology.*

33 La transition vers une économie plus écologique et durable exige des solutions innovantes pour réduire les émissions de gaz
34 à effet de serre, notamment dans le secteur des transports. Dans ce contexte, l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur
35 énergétique émerge comme une alternative prometteuse, en particulier pour décarboner les lignes de train non électrifiées où une
36 électrification traditionnelle ne serait pas rentable. Cela se traduit par un intérêt croissant pour le développement de systèmes de
37 stockage d'hydrogène embarqués dans les trains, offrant ainsi la possibilité de remplacer les trains hybrides électrique/fuel par
38 des modèles hybrides électrique/hydrogène.

39 Cette évolution vers l'utilisation de l'hydrogène dans le secteur ferroviaire soulève cependant des défis techniques et
40 réglementaires considérables. D'une part, les contraintes liées à la sécurité des systèmes de stockage d'hydrogène dans un
41 environnement ferroviaire dynamique sont primordiales. D'autre part, les réglementations strictes régissant le secteur ferroviaire
42 nécessitent une adaptation pour intégrer cette technologie novatrice. L'absence de retours d'expérience spécifiques dans le
43 domaine ferroviaire et les limites actuelles des standards pour l'hydrogène ajoutent une complexité supplémentaire à ce processus.

44 Cette communication cherche donc à illustrer la double contrainte inhérente à l'utilisation de l'hydrogène dans le secteur
45 ferroviaire, en mettant en lumière les enjeux et les défis associés. Nous présenterons une approche méthodologique destinée aux
46 acteurs de l'industrie, offrant des suggestions d'analyses de risques pour garantir un niveau de confiance suffisant dans la sécurité
47 des systèmes de stockage d'hydrogène embarqués dans les trains.

48 Dans cette perspective, nous exposerons les réglementations existantes et les limites des standards actuels pour l'hydrogène,
49 tout en soulignant la nécessité de respecter les process décrits par les standards de sécurité ferroviaire. Ensuite, nous détaillerons
50 notre approche méthodologique, en présentant les types d'analyses de risques utilisées pour évaluer les dangers et garantir un
51 niveau de confiance suffisant dans la sécurité des systèmes de stockage d'hydrogène embarqués dans les trains. Par la suite, nous
52 illustrerons notre propos à travers une étude de cas concret, où nous intégrerons les résultats de nos analyses de risques dans un
53 projet de stockage d'hydrogène pour les trains. Nous discuterons également des exigences techniques et des tests nécessaires pour
54 assurer la sécurité, tout en abordant les défis liés aux normes hydrogène et ferroviaires.

55 Enfin, nous proposerons des perspectives et des recommandations pour surmonter les défis actuels et favoriser une adoption
56 élargie et sécurisée de l'hydrogène comme source d'énergie dans le domaine ferroviaire.

57

58 II. STANDARDS ET DEFIS DE L'UTILISATION DE L'HYDROGENE DANS LE DOMAINE FERROVIAIRE

59 L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique dans le domaine ferroviaire est confrontée à plusieurs contraintes et
60 défis, notamment en termes de réglementations et de retours d'expérience spécifiques.

61 Les réglementations jouent un rôle crucial dans l'intégration de l'hydrogène dans le domaine ferroviaire. Le Règlement
62 UNECE No.134 (raccourcit en R134) [3], en particulier, établit des normes de sécurité pour le transport et le stockage de
63 l'hydrogène dans le domaine automobile, et utilisé dans un contexte ferroviaire par manque d'équivalent existant à ce jour. Cette
64 réglementation vise à assurer la protection des passagers, du personnel et de l'environnement contre les risques liés à l'utilisation
65 de ce gaz inflammable. La R134 définit ce qu'est un système de stockage hydrogène et quels sont les composants minimum à
66 savoir :

- 67 • Un réservoir
- 68 • Un clapet anti-retour (ou check valve)
- 69 • Une solénoïde vanne / électrovanne (ou SOV)
- 70 • Un système de décompression à réaction thermique (ou Thermally Pressure Relief Device TPRD)

71

72 Cependant, pour garantir la conformité et la sécurité maximale, certains composants doivent être certifiés selon des normes
73 spécifiques. Par exemple, la norme ANSI HGV3.1-2015 [5] spécifie les exigences techniques pour la fabrication, l'inspection et
74 le test des composants utilisés dans les systèmes de stockage d'hydrogène à haute pression. De même, la directive européenne
75 (2014/68/UE) sur les équipements sous pression PED (Pressure Equipment Directive) [7] établit des critères de conception et de
76 fabrication pour les composants soumis à des pressions élevées, garantissant ainsi leur fiabilité et leur sécurité.

77 En outre, la SAE J2600_201510 [8] joue un rôle crucial dans la régulation des stations de remplissage et des interfaces de
78 remplissage du système. Cette norme définit les procédures et les exigences de sécurité pour le remplissage des réservoirs
79 d'hydrogène à bord des trains, assurant ainsi une manipulation sûre et efficace de ce gaz inflammable.

80 En intégrant ces réglementations et ces normes dans notre étude, nous nous assurons que les systèmes de stockage d'hydrogène
81 suivent à minima les standards existants. Cependant nous verrons par la suite que ces derniers ne sont pas toujours suffisants et
82 ou adaptés à l'application visée.

83 Étant donné que l'étude présentée ci-après se concentre exclusivement sur la partie système (sans inclure les aspects logiciels),
84 seule la norme EN 50126 [1] a été appliquée, qui spécifie les exigences relatives à la sécurité dans le domaine des systèmes
85 ferroviaires.

86 Ainsi, toutes les analyses de sécurité ont suivi une approche systématique nécessaire à la gestion efficace des risques tout au
87 long du cycle de vie du projet, conformément au plan de sécurité établi. De plus, la validation est assurée à chaque phase du
88 projet par des instances indépendantes conformément aux exigences de la norme. Toute la documentation et les exigences liées
89 à la sécurité sont examinées et validées par un validateur et un ISA (Indépendant Safety Assessor) devant maîtriser à la fois les
90 normes CENELEC ainsi que le traitement de l'aspect hydrogène, garantissant ainsi la conformité aux normes et la fiabilité des
91 résultats obtenus.

92

93

III. ANALYSES DE RISQUES A METTRE EN PLACE

94

95

96

97

98

99

Dans le cadre du projet de développement de systèmes de stockage d'hydrogène pour les trains, plusieurs analyses de risques ont été conduites conformément au plan de sécurité établi. Ce plan, document essentiel en suivant la norme EN 50126, définit non seulement les diverses analyses de risques à entreprendre, mais également détaille l'organisation du projet, les responsabilités de chaque intervenant, le cycle de vie du projet lui-même, et assure qu'un système de gestion de la qualité rigoureux soit mis en place. De plus, il introduit la matrice de criticité, un outil essentiel qui guidera toutes les analyses de risques, jusqu'à la compilation finale dans le dossier de sécurité.

100

101

102

103

L'objectif fondamental de ces analyses est d'identifier, d'évaluer et de maîtriser les risques potentiels associés à l'utilisation de systèmes de stockage d'hydrogène dans un environnement ferroviaire. En comprenant les dangers et les vulnérabilités inhérents à cette technologie, nous visons à garantir un niveau de sécurité optimal tout au long du cycle de vie du projet, de la conception à l'exploitation.

104

105

106

Ce chapitre se concentrera sur les différentes analyses de risques envisagées dans le cadre du projet, en mettant l'accent sur leurs objectifs sans décrire leur construction dans le détail s'il n'y a pas de différence significative avec des analyses de risques classique. Nous explorerons également le rôle crucial de la matrice de criticité dans l'évaluation des risques.

107

108

A. Analyse Préliminaire de Risques

109

110

111

L'Analyse Préliminaire de Risques (APR) est une méthode d'évaluation des risques qui vise à identifier et à évaluer les dangers associés à un système ou un processus dès les premières étapes de sa conception. L'objectif principal de l'APR est de détecter les risques majeurs et les points critiques afin de mettre en place des mesures préventives ou correctives dès que possible.

112

113

C'est à l'aide de cette première analyse que les bonnes questions sont posées à l'ensemble de l'équipe afin sensibiliser chacun aux dangers liés à l'application ferroviaire d'un part, mais surtout liés à l'hydrogène.

114

115

B. Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité

116

117

118

En complément de l'APR, une Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) orientée composant est initiée. L'analyse de chaque composant de manière indépendante du système global ouvre la voie à des discussions approfondies entre les acteurs du projet, qui sont en contact direct avec les fournisseurs.

119

120

121

Cette interaction est essentielle pour qualifier de manière exhaustive les modes de défaillance des éléments, même ceux qui ne sont pas nécessairement connus en début de projet. En comprenant parfaitement le fonctionnement et le rôle de chaque composant du système, nous sommes en mesure d'évaluer de manière fiable les risques associés.

122

123

124

125

126

Au-delà de l'aspect recherche d'informations auprès des fournisseurs, il convient de noter que la méthode de l'AMDEC utilisée pour ce projet ne diffère pas fondamentalement de celle employée dans d'autres projets ferroviaires, même si elle est spécifiquement adaptée au contexte de l'utilisation de l'hydrogène. Les principes de base de l'AMDEC, tels que l'identification des modes de défaillance, l'évaluation de leurs effets, la détermination de leur criticité, et la recherche de barrières afin de maîtriser cette dernière restent les mêmes.

127

128

C. HAZard and OPerability Study

129

130

131

L'analyse HAZard and OPerability (HAZOP) est une méthode systématique largement utilisée dans l'industrie pour identifier les risques associés à un système, un processus ou une opération. Elle est particulièrement adaptée aux projets impliquant des substances inflammables ou dangereuses, comme l'hydrogène dans notre cas.

132

133

134

135

136

La méthode HAZOP consiste à découper le système étudié en différents nœuds (ou sections), puis à examiner de manière approfondie chaque d'entre eux pour identifier les écarts par rapport aux conditions normales de fonctionnement, ainsi que les causes de ces écarts. Dans le contexte de notre projet de stockage d'hydrogène pour les trains, cela signifie étudier le comportement attendu de l'hydrogène à chaque phase de l'exploitation du train, notamment lors de la consommation, du rechargement, du démarrage et de l'arrêt.

137

138

Pour chaque nœud, l'analyse HAZOP vise à identifier les causes possibles d'écart par rapport aux conditions normales, telles que les variations de pression, de température, de débit, etc. Ces écarts peuvent être le résultat de défaillances matérielles, de

139 déviations opérationnelles ou d'autres facteurs. Une fois ces écarts identifiés, l'objectif est de déterminer les conséquences
140 potentielles de ces écarts sur la sécurité du système et sur l'environnement.

141 L'analyse HAZOP permet ainsi d'explorer de manière exhaustive les différents scénarios et les défaillances potentielles du
142 système, en s'assurant que tous les risques sont identifiés et évalués. Cela permet ensuite de mettre en place des mesures
143 préventives ou correctives pour minimiser ces risques et garantir un fonctionnement sûr et fiable du système de stockage
144 d'hydrogène dans les trains.

145 Dans cadre de l'étude décrite au chapitre suivant, la partie Analyse des Risques aux Interfaces (ARI) a été intégrée à l'étude
146 HAZOP. En effet, chaque interface (en lien avec le fluide), qu'il s'agisse de la pile à combustible, des événements ou de l'interface de
147 remplissage, représente un point de connexion essentiel où les écarts par rapport aux conditions normales peuvent entraîner des
148 risques significatifs. Ainsi, toutes les interfaces ont été intégrées à un nœud dans notre analyse HAZOP, permettant une évaluation
149 exhaustive des risques associés à chaque point d'interaction dans le système. Cela garantit une prise en compte complète des
150 risques tout au long du cycle de vie du système.

151 Il a été nécessaire d'adapter la méthode de construction de l'HAZOP décrite dans norme NF EN 61882 afin de répondre aux
152 attentes du client tout en prenant en compte les contraintes techniques du système.

153

154 D. Analyse de Risque en Opération

155 L'Analyse de Risque en Opération (ARO) est une étape importante dans notre étude, en particulier en raison de la présence
156 d'hydrogène qui nécessite une sécurité accrue, même en dehors des phases d'exploitation normales, telles que la maintenance.
157 Cette analyse se base sur les tâches de maintenance décrites dans le manuel de maintenance du système de stockage d'hydrogène.
158 Chaque tâche de maintenance est minutieusement examinée afin d'identifier les risques pour les opérateurs et de recommander
159 des barrières ou des protections appropriées.

160 Il est essentiel de souligner que l'interaction avec les responsables du Soutien Logistique Intégré (SLI) est indissociable de
161 cette analyse. Le SLI, qui englobe l'ensemble des activités de soutien logistique d'un système tout au long de son cycle de vie,
162 joue un rôle important dans la planification et l'exécution des opérations de maintenance. Dans le cadre de l'ARO, cette intégration
163 permet de garantir que les modifications proposées pour améliorer la sécurité du système sont également réalisables d'un point
164 de vue opérationnel. Cela inclut la prise en compte de facteurs tels que la disponibilité des trains et les contraintes techniques,
165 afin de trouver un équilibre optimal entre sécurité et efficacité opérationnelle.

166 En résumé, l'ARO constitue une étape essentielle pour assurer la sécurité des opérateurs et du système de stockage
167 d'hydrogène dans toutes les phases de son cycle de vie, en mettant l'accent sur une approche proactive pour identifier et atténuer
168 les risques associés aux opérations de maintenance. La majorité des requis issus de l'ARO engendrent des modifications dans le
169 manuel de maintenance afin de les couvrir. Cette analyse peut également avoir une plus-value sur la partie conception avec
170 recommandation de modification (i.e. ajout d'une vanne d'isolement, une vanne de purge ou d'un manomètre).

171

172 E. Matrice de criticité

173 L'étape incontournable pour toutes ces analyses de risques, consiste à l'établissement d'une Matrice de Criticité, qui combine
174 les résultats des matrices de Fréquence et de Gravité. Ces matrices ont été élaborées et discutées lors de la création du Plan de
175 Sécurité, en prenant en compte les spécificités du système de stockage d'hydrogène pour les trains.

176 La Matrice de Fréquence évalue la probabilité d'occurrence des événements indésirables, tandis que la Matrice de Gravité
177 évalue la sévérité des conséquences associées à ces événements. Ces deux matrices ont été définies en fonction des
178 caractéristiques propres au projet, en se basant sur des standards liés au monde ferroviaire et des exigences du client. Ces deux
179 matrices sont présentées en Tab.I et Tab.II.

180

181

TABLE I. MATRICE DE FREQUENCE

Catégorie	Définition	Classification	Probabilité d'occurrence par heure de fonctionnement
Fréquent	Susceptible de se produire très souvent	A	$P > 10^{-3}$
Probable	Susceptible de se produire fréquemment	B	$10^{-3} \geq P > 10^{-4}$
Occasionnelle	Susceptible de se produire plusieurs fois	C	$10^{-4} \geq P > 10^{-6}$
Rare	Susceptible de survenir quelques fois	D	$10^{-6} \geq P > 10^{-7}$
Improbable	Improbable mais susceptible de survenir exceptionnellement	E	$10^{-7} \geq P > 10^{-9}$

Invraisemblable	Extrêmement improbable que l'événement survienne, étant donné les connaissances acquises sur le système et le domaine d'emploi	F	$P < 10^{-9}$
-----------------	--	---	---------------

182

183

TABLE II. MATRICE DE GRAVITÉ

Catégorie de gravité	Conséquences sur les personnes	Conséquences sur le Matériel	Environnement	Classe
Catastrophique	Blessures sur un grand nombre de personnes et pouvant entraîner la mort	Destruction	Dommages graves pour l'environnement	IV
Critique	Blessures de quelques personnes entraînant des handicaps (blessures graves)	Endommagement notable	Dommages importants pour l'environnement	III
Significatif	Blessures de personnes n'entraînant pas d'handicaps (blessures légères)	Endommagement faible	Dommage faible pour l'environnement	II
Mineur	Inconfort temporaire	Sans endommagement	Sans dommages pour l'environnement	I

184

185 Une fois les matrices de Fréquence et de Gravité établies, elles ont été combinées pour former la Matrice de Criticité. Cette
186 matrice classe les différents risques en fonction de leur niveau de criticité, en tenant compte à la fois de leur probabilité
187 d'occurrence et de leur impact sur la sécurité du système. Cette matrice est présentée en Tab.III.

188

TABLE III. MATRICE DE CRITICITE

Classification de fréquence		Matrice de risque sécurité			
Fréquent	A	Indésirable	Inacceptable	Inacceptable	Inacceptable
Probable	B	Acceptable	Indésirable	Inacceptable	Inacceptable
Occasionnelle	C	Acceptable	Indésirable	Indésirable	Inacceptable
Rare	D	Négligeable	Acceptable	Indésirable	Indésirable
Improbable	E	Négligeable	Négligeable	Acceptable	Indésirable
Invraisemblable	F	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Acceptable
		I	II	III	IV
		Mineur	Significatif	Critique	Catastrophique
Niveau de sévérité des conséquences de la défaillance					

189

190 Il est important de souligner que ces matrices ont été soumises à une validation avec le client, garantissant ainsi leur pertinence
191 et leur adéquation aux objectifs de sécurité du projet. Elles pourront par la suite servir de référence pour des analyses de risques
192 sur des sujets similaires.

193 La Matrice de Criticité résultante constitue un outil précieux pour hiérarchiser les risques identifiés et orienter les efforts
194 d'atténuation vers les aspects les plus critiques de la sécurité du système de stockage d'hydrogène dans les trains. La méthode
195 GAME n'est pas employée pour définir la matrice car l'absence de recul sur la partie hydrogène oblige à avoir un aspect plus
196 conservateur par rapport à une étude ferroviaire plus classique.

197

199 A. Contexte et description du système

200 Le contexte de ce projet réside dans la nécessité de concevoir un système de stockage d'hydrogène pour l'intégrer à un nouveau
 201 train hybride électrique/hydrogène, répondant ainsi à la demande croissante de décarbonation des lignes de train non électrifiées.
 202 La société OPmobility a été chargée du développement du système, avec le support de SERES-Technologies pour l'étude de
 203 sécurité.

204 Le système est constitué de racks comprenant chacun sept réservoirs. Quatre de ces racks, associés à une « Gas Treatment
 205 Unit » (GTU), forment un « Compressed Hydrogen Storage System » (CHSS). Chaque train est équipé de deux CHSS, en notant
 206 que chacun d'eux étant suffisant pour assurer la traction du train. L'ensemble du système est intégré dans une voiture (wagon)
 207 spécifique du train appelée « power car », comme illustré dans la Fig.1. Les réservoirs d'hydrogène, certifiés selon le règlement
 208 UNECE No.134, sont conçus pour supporter une pression maximale de 350 bars (à 20°C) et ont un volume unitaire de 237 litres.

209

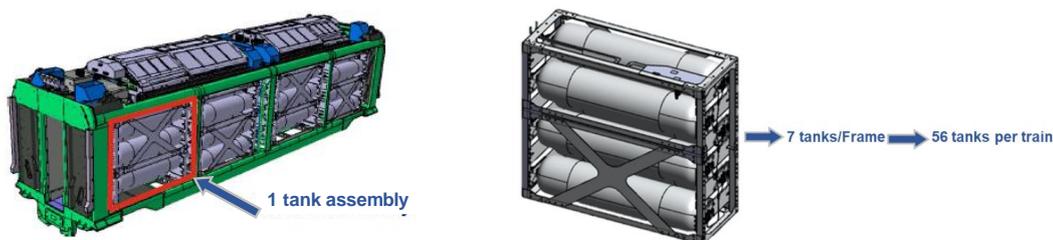
210

211

212

213

214



215 Fig. 1. Modèle 3D de la « power car » (à gauche) et d'un rack de sept réservoirs (à droite)

216 Le système est considéré comme sûr lorsque l'hydrogène est contenu dans les réservoirs de manière contrôlée. Chaque
 217 réservoir est équipé d'une électrovanne normalement fermée (SOV), et chaque rack peut être isolé par une SOV indépendante.
 218 La GTU peut également être isolée en amont et en aval, permettant ainsi un contrôle précis du flux d'hydrogène. Des capteurs de
 219 pression et de température sont utilisés pour surveiller en permanence les paramètres physiques de l'hydrogène et garantir un
 220 fonctionnement optimal du système.

221 En cas de surpression ou de sous-pression dans la GTU, un pressostat situé du côté moyenne pression (MP) assurent une
 222 sécurité mécanique supplémentaire. Il est prévu de pouvoir réaliser une purge côté MP ou côté haute pression (HP) du système.
 223 Des interfaces de purge ont été ajoutés à la conception en plus des vannes manuelles afin d'assurer une redondance de l'étanchéité
 224 du système. Les matériaux utilisés pour les composants ont été sélectionnés pour leur conformité aux certifications requises et
 225 pour leur résistance aux conditions d'exploitation.

226 Enfin, tous les composants sont soumis à des tests rigoureux (ex : chocs et vibrations, feu et fumée), tant au niveau composants
 227 qu'au niveau du système, afin de garantir leur fiabilité et la sécurité du système.

228

229 B. Principaux dangers à mettre sous contrôle sur un système de stockage hydrogène

230 Les risques liés à l'utilisation de l'hydrogène sont multiples et les conséquences d'une défaillance du système de stockage
 231 peuvent être catastrophique. Les analyses de risques entreprises visent à identifier les défaillances et les scénarios potentiels, dont
 232 les principaux risques sont donnés ci-après. Seuls les dangers sont listés et non les protections ou les barrières qui sont, elles,
 233 proposées dans les chapitres suivants.

234 • Fuite :

235 En raison de la nature du gaz, les fuites sont inévitables dans tout système de stockage d'hydrogène. Il est crucial de contrôler
 236 le taux de fuite, qui peut être influencé par la taille du trou et la pression dans le système. Deux types de fuites sont distingués :
 237 les « fuites crédibles » caractérisées par un diamètre maximum , et les fuites plus importantes.

238 Des simulations ont permis de quantifier le taux de fuite limite des « fuites crédibles », garantissant qu'aucune conséquence
 239 dangereuse ne peut en résulter, telles que la formation d'une zone ATEX (ATmosphère EXplosive) (volatilité du gaz à considérer)
 240 ou un jet de flamme (conditions stœchiométriques entre l'hydrogène et l'oxygène à considérer).

241 De plus, la perméation, bien que mesurable, est un facteur à prendre en compte dans l'estimation des rejets d'hydrogène hors
 242 du système de stockage.

243 • Explosion :

244 Contrairement aux fuites, les explosions nécessitent un événement initiateur externe, tel qu'un incendie ou étincelle survenant
 245 à proximité du système de stockage. En cas d'incendie à proximité du système, l'intégrité mécanique des réservoirs peut être
 246 compromise. Dans de telles circonstances, les réservoirs peuvent subir des défaillances structurelles et éventuellement exploser.
 247 Les conséquences d'une explosion peuvent être catastrophiques, entraînant des dommages matériels étendus, des blessures graves
 248 voire des pertes en vies humaines.

249 • Eclatement :

250 L'éclatement, souvent appelé « burst » dans le contexte des systèmes de stockage d'hydrogène, fait référence à la rupture
251 soudaine et non contrôlée d'un composant ou d'un réservoir sous pression. Contrairement aux fuites, qui impliquent généralement
252 une libération progressive de gaz, un éclatement se produit brusquement, souvent avec des conséquences plus graves.

253 Les principaux facteurs contribuant à un éclatement sont les défauts de fabrication, les fissures ou les faiblesses structurelles
254 dans les composants sous pression. L'accumulation de stress, qu'il s'agisse de stress thermique, mécanique ou chimique, peut
255 également jouer un rôle dans la survenue d'un éclatement.

256 Les conséquences d'un éclatement peuvent être similaires à celles d'une explosion, avec des dommages matériels étendus, des
257 risques pour la sécurité des personnes et des pertes potentielles en vies humaines. Par conséquent, la prévention des éclatements
258 est une préoccupation majeure dans la conception et l'exploitation des systèmes de stockage d'hydrogène.

259 • Jet de flamme :

260 Le jet de flamme, ou « jet fire » en anglais, fait référence à un phénomène dans lequel un écoulement continu de gaz
261 inflammable prend feu après avoir été libéré d'un système sous pression. Ce type d'événement peut survenir lorsqu'une fuite
262 importante se produit dans le système, entraînant la formation d'un nuage de gaz combustible qui peut s'enflammer au contact
263 d'une source d'ignition externe. Un jet de flamme peut également survenir lors d'une activation de TPRD au niveau des événements.
264 Dans ce cas il s'agit d'un jet contrôlé dans une direction connue (ici, le toit du train).

265 Les principaux dangers associés au jet de flamme comprennent les risques d'incendie et de propagation rapide des flammes.
266 Un jet de flamme peut être extrêmement chaud et intense, capable de causer des brûlures graves et des dommages matériels
267 étendus dans son environnement immédiat.

268 Les conséquences d'un jet de flamme dépendent de facteurs tels que la quantité de gaz libérée, la pression du système, les
269 conditions environnementales et la présence de sources d'ignition potentielles. Dans certains cas, un jet de flamme peut également
270 entraîner des explosions secondaires ou des dommages structurels aux équipements environnants. Il faut également noter qu'un
271 jet de flamme d'hydrogène peut être invisible à l'œil nu ce qui accroît encore le danger pour des personnes se trouvant à
272 proximité.

273

274 C. Les sécurités apportées par les analyses de risques et par les standard hydrogène

275 Les analyses de risques et les standards permettent de mettre en lumière des risques dont la criticité peut être quantifiée. Une
276 fois les risques évalués, des mesures de prévention et de contrôle sont mises en place pour garantir la sécurité du système. Ces
277 mesures, sous forme de requis, sont émises pour être prises en compte à différents niveaux, que ce soit en interne, chez le client
278 final ou chez l'exploitant. Tous les requis sont consignés dans un Registre des Situations Dangereuses (RSD), assurant ainsi le
279 suivi de leur couverture tout au long du cycle de développement (cycle en V), à la fois en phase de conception (phase descendante)
280 et en phase de validation (phase remontante). Dans le cadre de cette étude de cas, environ 200 requis ont été identifiés, entraînant
281 des implications tant au niveau de la conception, de la maintenance ou de l'exploitation. Ce chapitre examinera les mesures
282 spécifiques mises en œuvre pour répondre aux risques identifiés précédemment.

283

284 Dans le cadre de la prévention des explosions et des jets de flamme, les études ont permis de démontrer qu'il était nécessaire
285 de mettre en place plusieurs mesures pour assurer la sécurité du système de stockage d'hydrogène. Tout d'abord, un système
286 permettant de détecter toute augmentation anormale de température et de déclencher une alarme avant l'activation des dispositifs
287 TPRD en cas de feu. Les TPRD quant à elles permettent une purge rapide et contrôlée par des événements spécifiques, garantissant
288 (mécaniquement) l'évacuation de l'hydrogène en cas d'incendie. De plus, chaque réservoir est équipé d'une TPRD à chaque
289 extrémité pour assurer un déclenchement même en cas de feu localisé. Les réservoirs, certifiés selon le règlement UNECE
290 No.134, sont dimensionnés pour maintenir leur intégrité pendant 22 minutes (fonction du type de feu) avant que celle-ci ne soit
291 compromise. Des essais destructifs, couplés à des simulations 1D, ont été réalisés pour garantir cette résistance minimale, assurant
292 ainsi une sécurité accrue du système.

293 Pour prévenir les fuites potentielles, des mesures strictes ont été mises en place dans le système de stockage d'hydrogène. Des
294 tests de fuite réguliers sont imposés au travers du manuel de maintenance, en particulier lors des premières phases d'utilisation
295 du système afin de surveiller les éventuels défauts de jeunesse. De plus, un processus de détection automatique est intégré, basé
296 sur des capteurs qui comparent les pressions entre un arrêt d'exploitation et la reprise suivante. Cette méthode permet une
297 détection précoce des variations de pression qui pourraient indiquer une fuite, assurant ainsi une intervention rapide pour corriger
298 tout problème et maintenir l'intégrité du système.

299 Pour minimiser les risques d'éclatement ou de surpression, plusieurs mesures de sécurité ont été implémentées dans le système
300 de stockage d'hydrogène. Tout d'abord, les limites de pression autorisées sont clairement définies et communiquées à la station
301 de remplissage, assurant ainsi une manipulation sécurisée lors du remplissage des réservoirs. De plus, le respect de la directive
302 PED est appliqué tant au niveau composants qu'au niveau du système global, avec une validation de la documentation et des
303 essais effectués par un « Notified Body » (NoBo). Des tâches de maintenance préventives, au travers d'inspections périodique,
304 sont imposées afin de garantir que l'intégrité du système n'est pas compromise. Une surveillance continue de la température est
305 assurée pour éviter toute perte d'intégrité du liner (partie interne des réservoirs), en respectant notamment la limite de température

306 basse autorisée de -40°C . La tuyauterie est conçue pour résister à une surpression allant jusqu'à quatre fois la pression normale
307 d'utilisation, et des essais sont réalisés selon la norme HGV 3.1 pour vérifier leur conformité. En ce qui concerne les raccords,
308 qui ne sont pas couverts par la norme HGV 3.1, des essais conformes au règlement européen (CE) No.79/2009 [4] sont effectués.
309 De plus, du côté de la MP, un pressostat est installé pour couper mécaniquement l'alimentation en hydrogène en cas de détection
310 de surpression, ajoutant ainsi une couche supplémentaire de sécurité au système.

311

312 *D. Difficultés rencontrées et limites actuelles sur l'utilisation des réglementations / normes H2 pour une application* 313 *ferroviaire*

314 Malgré les progrès dans le développement de technologies liées à l'hydrogène, le secteur ferroviaire manque encore de retours
315 d'expérience spécifiques concernant son utilisation. Cette absence de données empiriques constitue un défi majeur pour les acteurs
316 du domaine, car elle rend difficile l'évaluation quantitative au sein des études de sécurité. De plus, les réglementations / normes
317 actuels pour l'hydrogène, bien que robustes dans d'autres contextes, peuvent présenter des limites lorsqu'ils sont appliqués au
318 secteur ferroviaire. Par conséquent, il est impératif de développer des réglementations / normes spécifiques et adaptés aux
319 exigences uniques de l'hydrogène dans les trains ou de rendre plus lisible les liaisons entre les différents standards.

320 De plus, les réglementations / normes actuels pour l'hydrogène, bien que robustes dans d'autres contextes, peuvent présenter
321 des limites lorsqu'ils sont appliqués au secteur ferroviaire. Par exemple, le règlement européen (CE) No.79/2009, abrogée en
322 juillet 2022, fournissait une base pour les niveaux d'exigence spécifiques et les tests à réaliser. Sa disparition a laissé un vide
323 réglementaire, nécessitant désormais le recours à plusieurs réglementations / normes pour couvrir l'ensemble des composants.
324 Cette fragmentation peut compliquer la conformité et la cohérence des systèmes d'hydrogène embarqués dans les trains. En effet,
325 respecter les standards associés à un système ou un process permet d'apporter un certain nombre de preuve à un ISA par exemple.
326 Si ces standards ne sont pas exhaustifs il est plus délicat de démontrer la pertinence d'une procédure de test par exemple.

327 En outre, il convient de noter que les réglementations / normes liés au système d'hydrogène ne sont pas tous issus de la même
328 zone géographique, ce qui peut entraîner des divergences dans les exigences et les méthodologies d'essai. Cette hétérogénéité
329 peut compliquer la conformité réglementaire et la certification des systèmes d'hydrogène pour une utilisation ferroviaire
330 internationale.

331 Le manque de données de fiabilité des composants constitue également une limite significative pour la mise en œuvre de
332 projets d'hydrogène dans le domaine ferroviaire. Les fournisseurs de composants manquent souvent de recul sur la performance
333 à long terme de leurs équipements, ce qui rend difficile l'estimation des risques et des défaillances potentielles. De plus, le client
334 final peut être prudent à utiliser des données provenant de bases de données généralistes, telles que le NPRD (Nonelectronic Parts
335 Reliability Data) [6], en raison de leur manque de spécificité et de précision pour les applications ferroviaires et hydrogène. Cette
336 situation nécessite une collaboration étroite entre les fournisseurs, les opérateurs ferroviaires et les organismes de réglementation
337 pour développer des méthodologies d'évaluation fiables et des standards adaptés aux besoins spécifiques du secteur ferroviaire.
338 Dans des cas particuliers des études de sécurité, l'utilisation de taux de défaillance chiffrés a été indispensable, notamment pour
339 réaliser des allocation SIL (Safety Integrity Level) sur des fonctions de sécurité. Dans ce cas précis la base NPRD a été utilisé
340 avec prudence en restant systématiquement le plus conservateur sur les valeurs utilisées.

341

342 L'apprentissage concernant l'hydrogène progresse néanmoins rapidement et les fournisseurs de composants arrivent à
343 apporter des réponses de manière incrémentale aussi en fonction de leur analyses internes. Ainsi tout au long du projet les
344 hypothèses et les contraintes d'exploitations évolues (souvent en s'assouplissant). En effet l'amélioration de la précision des
345 simulations et la multiplication des essais physiques permettent de connaître de mieux le comportement des composants et du
346 système en fonction des phases d'exploitation, de l'environnement extérieur, des variations des paramètre physiques du gaz, etc.

347

348 V. CONCLUSION

349 Les perspectives sur l'avenir de l'utilisation de l'hydrogène dans le secteur ferroviaire sont prometteuses, malgré les défis
350 actuels. Avec une pression croissante pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et promouvoir une mobilité plus durable,
351 l'hydrogène émerge comme une alternative viable aux carburants fossiles dans le domaine ferroviaire. Son potentiel à long terme
352 réside dans sa capacité à fournir suffisamment d'hydrogène vert, mais aussi dans l'amélioration technique des composant à
353 intégrer (de par leur technologie, leur encombrement, leur fiabilité, leur niveau de sécurité). De plus, l'hydrogène offre une
354 solution attrayante pour les lignes non électrifiées ou difficiles à électrifier, offrant une plus grande flexibilité dans le déploiement
355 de nouvelles lignes. Cependant, pour réaliser pleinement ce potentiel, des investissements continus dans la recherche et le
356 développement sont nécessaires pour améliorer l'efficacité, la sécurité et la rentabilité des systèmes d'hydrogène ferroviaires. Des
357 efforts dans les tests de durabilité des composant semble également inévitable afin de pouvoir reposer les études sur des données
358 quantitatives robustes. De même, des collaborations étroites entre les gouvernements, les entreprises, les instituts de recherche et
359 les organismes de normalisation sont essentielles pour établir des normes et des réglementations harmonisées, garantissant ainsi
360 l'interopérabilité et la sécurité des systèmes d'hydrogène à l'échelle d'abord européenne puis internationale.

361

362 En conclusion, cet article présente en détail les défis et les opportunités liés à l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur
363 d'énergie dans le secteur ferroviaire. Nous avons exploré les différents risques associés à cette technologie, ainsi que les mesures

364 préventives et les principales normes de sécurité nécessaires pour les atténuer. De plus, nous avons discuté de l'importance des
365 analyses de risques et de la conformité aux normes hydrogène pour garantir la sécurité des systèmes de stockage de ce gaz. Enfin,
366 nous avons aussi présenté les perspectives de l'utilisation de l'hydrogène dans le secteur ferroviaire, ainsi que les recommandations
367 pour surmonter les défis actuels et favoriser une adoption élargie et sécurisée de cette technologie innovante. En combinant ces
368 éléments, nous pouvons envisager un avenir où l'hydrogène jouera un rôle essentiel dans la transition vers une mobilité ferroviaire
369 plus durable et respectueuse de l'environnement.

370

371

372

373

374

375

REMERCIEMENTS

376 Nous tenons à remercier sincèrement Paul-Emile POISSON et Hugues CARRE de chez OPmobility pour leur précieuse
377 collaboration et leur leadership tout au long du développement du stockage d'hydrogène ferroviaire. Leurs connaissances et leur
378 dévouement ont été essentiels pour relever les défis techniques et réglementaires de ce projet.

379 Un grand merci également à Julien RULLIER de chez SERES-Technologies pour avoir rendu possible cette collaboration
380 fructueuse et pour avoir permis la présentation de nos travaux à travers cet article. Nous souhaitons également exprimer notre
381 gratitude à Julie WEPFER de chez SERES-Technologies pour son avis d'expert du domaine ferroviaire, qui a enrichi notre
382 démarche.

383 Nous remercions également Laura AUSSOURD pour son aide en tant que relectrice, qui a contribué à améliorer la qualité de
384 notre communication.

385 Enfin, nous exprimons notre gratitude envers l'IMdR pour l'organisation du congrès $\lambda\mu 24$, qui nous offre une belle
386 opportunité de présenter nos travaux en termes de stockage d'hydrogène.

387

388

BIBLIOGRAPHIE

- 389 [1] CENELEC - EN 50126-1 Railway Applications - The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) -
390 Part 1: Generic RAMS Process
- 391 [2] CENELEC - EN 50126-2 Railway Applications - The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) -
392 Part 2: Systems Approach to Safety
- 393 [3] Règlement No.134 – (CEE-ONU) – Prescriptions uniformes relatives à l'homologation des véhicules automobiles et de leurs composants en ce qui concerne
394 les prescriptions de sécurité des véhicules fonctionnant à l'hydrogène (2022)
- 395 [4] Règlement (CE) No.79/2009 du Parlement européen et du Conseil du 14 janvier 2009 concernant la réception par type des véhicules à moteur fonctionnant
396 à l'hydrogène et modifiant la directive 2007/46/CE
- 397 [5] CSA HGV 3.1 - Fuel system components for compressed hydrogen gas powered vehicles (2019)
- 398 [6] Quanterion Solutions. (2016). NPRD-2016: Nonelectronic Parts Reliability Data
- 399 [7] Directive européenne 2014/68/UE. Directive concernant l'harmonisation des législations des États membres relatives aux équipements sous pression
- 400 [8] SA SAE International. (2015). SAE J2600: Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles. Warrendale, PA: SAE International