



Réindustrialisation automobile : La Sûreté de Fonctionnement au Cœur des Véhicules Écologiques

Automotive Reindustrialization: Reliability at the Heart of Eco-Friendly Vehicles

BARBAT Jérôme

SECTOR

Toulouse

jerome.barbat@sector-group.net

MACHKOUR Malake

SECTOR

Toulouse

malake.machkour@sector-group.net

SORIN Thomas

SECTOR

Paris

thomas.sorin@sector-group.net

1 **Résumé** — Les transports sont responsables d'une part non négligeable des émissions de gaz à effet de serre, et ce sont les
2 véhicules des particuliers (54 %) et les poids lourds (21 %) qui émettent la grande majorité du CO2 générée par ce secteur [1].

3 Pour faire face à cette accélération des phénomènes de dérèglement climatique, le secteur automobile traverse actuellement
4 une phase de réindustrialisation afin de s'orienter vers des technologies plus respectueuses de l'environnement et l'hydrogène
5 est au cœur de cette évolution. Avec la possibilité de faire le plein en quelques minutes d'un carburant zéro émissions, les véhicules
6 à hydrogène facilitent cette transition vers un avenir plus écologique. L'un des avantages de l'hydrogène réside notamment dans
7 la possibilité d'en obtenir à partir de divers éléments présents dans la nature grâce à son abondance en tant que source d'énergie.

8 Cependant, malgré le potentiel prometteur de l'hydrogène, il est important de ne pas sous-estimer les risques qu'il présente.
9 Il est essentiel de trouver un équilibre entre les avantages indéniables de cette technologie et les préoccupations légitimes
10 concernant sa sûreté afin d'assurer un avenir automobile plus sûr, plus propre et plus durable.

11 Dans le cadre de ses études de Maîtrise des Risques dans l'industrie automobile, SECTOR intervient dans de nombreux
12 projets liés aux véhicules à hydrogène. En accompagnant plusieurs acteurs industriels du secteur automobile dans le
13 développement de systèmes sûrs liés à la propulsion hydrogène dont les piles à combustible elles-mêmes, SECTOR a pu au
14 travers de ses travaux établir une cartographie des performances et risques associés et les comparer aux véhicules thermiques.

15 **Mots-clefs** — *Hydrogène, Automobile, Ecologie, ISO 26262, Durabilité.*

16 **Abstract** — Transport is responsible for a significant portion of greenhouse gas emissions, and it is private vehicles (54%) and
17 heavy goods vehicles (21%) which emit the vast majority of CO2 generated by this area [1].

18 To cope with this acceleration of climate change phenomena, the automotive sector is currently going through a phase of
19 reindustrialization in order to move towards more environmentally friendly technologies, and hydrogen is at the heart of this
20 evolution, with the possibility to refuel in just a few minutes with zero-emission fuel, hydrogen vehicles facilitate this transition
21 to a more ecological future. One of the advantages of hydrogen lies in the possibility of obtaining it from various elements present
22 in nature thanks to its abundance as a source of energy.

23 However, despite the promising potential of hydrogen, it is important not to underestimate the risks it presents. Balancing the
24 undeniable benefits of this technology with legitimate concerns about its safety is essential to ensure a safer, cleaner and more
25 sustainable automotive future.

26 As part of its Risk Management studies in the automotive industry, SECTOR is involved in projects related to hydrogen
27 vehicles. By supporting several industrial players in the automotive sector in the development of systems linked to hydrogen
28 propulsion including the fuel cells themselves, SECTOR was able, through its work, to establish a map of the associated
29 performances and risks and compare them to thermal vehicles.

30 **Keywords** — *Hydrogen, Automotive, Ecology, ISO 26262, Sustainability.*

31

33 Les véhicules sont de plus en plus confrontés à des réglementations pour contrôler les émissions polluantes, ce qui représente
 34 un réel défi pour les constructeurs automobiles afin de proposer des véhicules à la fois puissants et à faibles émissions. De plus,
 35 les prix actuels des carburants continuent d'augmenter en raison de leur accessibilité limitée. Il est donc temps de repenser les
 36 véhicules automobiles telles que nous les connaissons et d'opter pour une source d'énergie plus propre et plus durable.

37 L'un des avantages de l'hydrogène réside dans sa disponibilité quasi-illimitée en tant que source d'énergie, puisqu'il est
 38 possible d'en obtenir à partir de divers éléments présents dans la nature en grande quantité dont l'eau. Cette transition écologique
 39 profitera non seulement notre planète et notre environnement, mais permettra également aux concepteurs de maximiser les
 40 performances des véhicules développés sans être limités par les émissions.

41 Pour mettre en œuvre cette technologie, il est important qu'elle soit sûre, avec une maîtrise rigoureuse des risques. SECTOR
 42 se base sur les directives de la norme ISO 26262 [2], ce qui permet de proposer une stratégie globale de gestion des risques pour
 43 les véhicules, en appliquant une méthodologie éprouvée qui a déjà fait ses preuves dans le domaine des véhicules thermiques et
 44 plus récemment dans celui des véhicules électriques.

45 II. COMPARATIF : VEHICULES A HYDROGENE ET VEHICULES THERMIQUES

46 A. Architecture fonctionnelle : Thermique VS Hydrogène

47 Les moteurs thermiques ont dominé le secteur automobile pendant plus d'un siècle, cependant leur impact écologique qui est
 48 loin d'être négligeable, suscite le besoin de trouver des alternatives qui préservent les avantages de cette technologie avec un
 49 impact environnemental réduit et l'hydrogène a émergé comme une option prometteuse pour une mobilité propre.

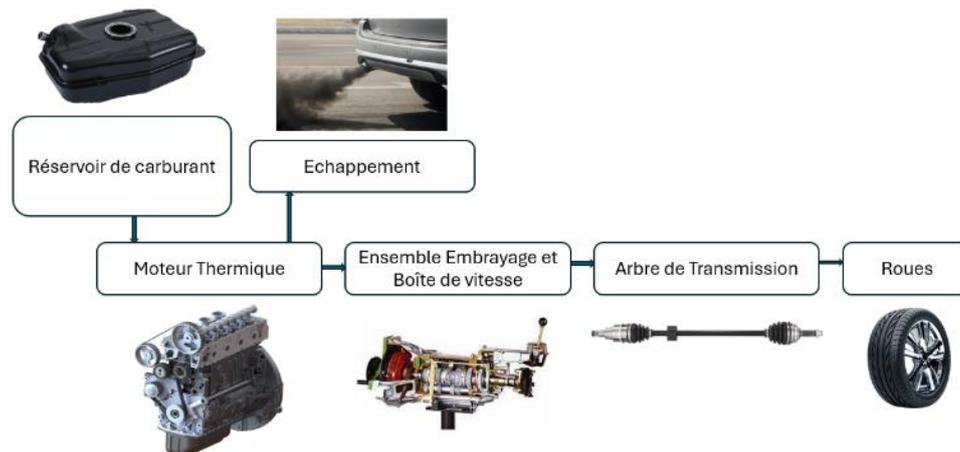
50 Ces deux technologies conçus pour le même usage de transport, divergent dans leur conception et leur impact
 51 environnemental.

52 1) Vehicules Thermiques

53 Dans un véhicule thermique, le réservoir de carburant stocke le carburant nécessaire pour la combustion interne qui est
 54 généralement de l'essence ou du diesel. Ce carburant est acheminé vers le moteur où il est mis en contact sous forme pulvérisée
 55 avec de l'air à haute température et à haute pression, cette combustion libère une énergie qui est transférée sous la forme d'une
 56 énergie mécanique par rotation. Cette énergie mécanique est ensuite transmise à travers le système de transmission qui comprend
 57 l'embrayage et la boîte à vitesse, l'embrayage connecte et déconnecte le moteur de la boîte à vitesse afin de permettre au
 58 conducteur de changer de vitesse et contrôler la puissance transmise aux roues. La boîte à vitesse adapte la vitesse générée par
 59 le moteur pour un meilleur contrôle du véhicule et finalement l'arbre de transmission transmet la puissance mécanique du moteur
 60 aux roues.

61 Les gaz résultant de la combustion sont évacués par le système d'échappement.

62 L'architecture fonctionnelle d'un véhicule thermique est illustrée dans Fig. 1. Architecture fonctionnelle d'un véhicule
 63 thermique ci-dessous :



64

65

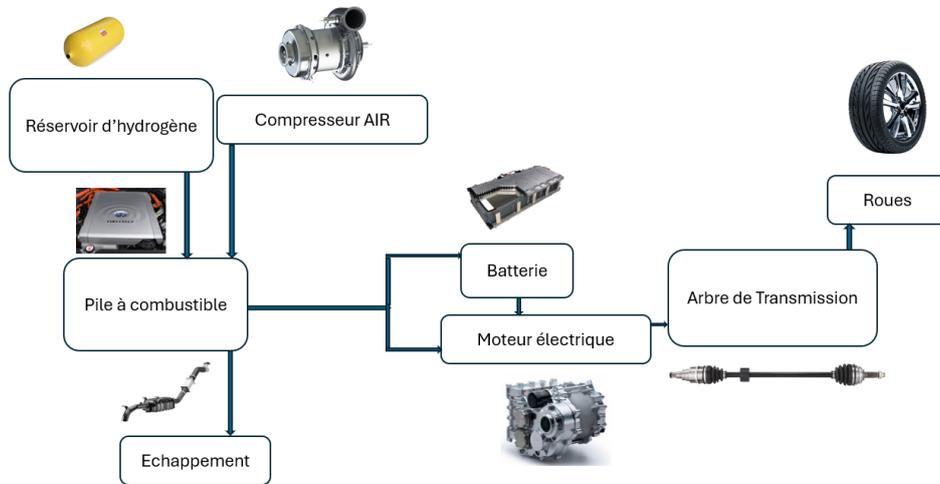
Fig. 1. Architecture fonctionnelle d'un véhicule thermique

66 2) Vehicules à hydrogène

67 Dans un véhicule à hydrogène, le réservoir d'hydrogène stocke le carburant nécessaire pour l'utilisation de la pile à
 68 combustible et le compresseur d'air aspire l'air ambiant et le comprime avant de l'envoyer à la pile à combustible. L'hydrogène
 69 et l'oxygène de l'air comprimé réagissent pour produire de l'électricité et de l'eau au sein de la pile à combustible, l'eau produite
 70 par la réaction dans la pile à combustible est évacuée du véhicule par le système d'échappement et l'électricité produite est
 71 ensuite acheminée vers le moteur électrique qui convertit l'électricité en mouvement mécanique. Finalement, l'arbre de
 72 transmission transmet la puissance mécanique du moteur électrique aux roues.

73 Le véhicule contient également une batterie qui stocke l'électricité excédentaire générée par la pile à combustible et fournit
74 une puissance supplémentaire lors de la demande de pointe afin d'optimiser l'efficacité énergétique du véhicule.

75 L'architecture fonctionnelle d'un véhicule thermique est illustrée dans Fig. 2. Architecture fonctionnelle d'un véhicule à
76 hydrogène ci-dessous.



77
78 Fig. 2. Architecture fonctionnelle d'un véhicule à hydrogène

79 B. Emissions en phase de fabrication

80 Les voitures électriques et à hydrogène ont des émissions comparables lors de la fabrication, avec 9,2 tonnes de CO₂e pour
81 le véhicule électrique et 9,7 tonnes pour l'hydrogène [5].

82 En comparaison, la fabrication des voitures thermiques (essence et diesel) est moins émissive, avec environ 5,5 tonnes de
83 CO₂e [5].

84 C. Emissions en phase d'utilisation

85 Sur 200 000 kilomètres parcourus, le véhicule électrique émet 56 gCO₂e/km.

86 Le véhicule hydrogène issu de l'électrolyse émet 79 gCO₂e/km, et celui issu du vaporeformage de gaz naturel émet 197
87 gCO₂e/km.

88 Les véhicules thermiques, ont un facteur d'émission moyen de 214 gCO₂e/km.

89 1) Electrolyse

90 L'électrolyse est une méthode de production d'hydrogène en utilisant de l'électricité pour décomposer l'eau en hydrogène et
91 oxygène. Ce procédé est propre si l'électricité provient de sources renouvelables.

92 L'électrolyse est souvent questionnée pour son utilisation d'électricité pour produire de l'hydrogène, qui peut ensuite être
93 utilisé pour produire de l'électricité, mais l'utilisation de l'hydrogène comme carburant pour les véhicules à pile à combustible
94 présente plusieurs avantages par rapport à l'utilisation directe de l'électricité dans les véhicules électriques à batterie, parmi ces
95 avantages, on trouve une autonomie supérieure, un temps de recharge rapide, et des réservoirs d'hydrogène plus légers que les
96 batteries des véhicules électriques.

97 2) Vaporeformage

98 Le vaporeformage est une technique est un procédé de production de l'hydrogène à partir du gaz naturel exposé à de la vapeur
99 d'eau à haute température pour générer du monoxyde de carbone et de l'hydrogène, le monoxyde de carbone produit réagit
100 ensuite avec de la vapeur supplémentaire pour être transformé en dioxyde de carbone et hydrogène supplémentaire.

101 Ce processus produit une quantité significative de CO₂, ce qui le rend moins favorable sur le plan environnemental par
102 rapport à l'électrolyse.

103 D. Emissions sur le cycle de vie

104 Comparée à une berline essence, une berline hydrogène permet de réduire de 23% les émissions de CO₂e si l'hydrogène est
105 produit par vaporeformage, et de 74% en moyenne si l'hydrogène est issu de l'électrolyse [5].

106 Les voitures hydrogène émettent 41% de plus d'émissions de CO₂e sur l'ensemble du cycle de vie qu'un véhicule électrique.

107 E. Consommation

108 Les voitures fonctionnant à l'essence consomment en moyenne 7,54 litres pour parcourir 100 kilomètres. En considérant une
109 densité moyenne de l'essence de 0,745 kg/L, cela se traduit par une consommation de carburant d'environ 5,617 kg pour chaque
110 100 km parcourus.

111 De l'autre côté, les voitures diesel consomment en moyenne 6,11 litres pour la même distance. Avec une densité moyenne
112 du diesel de 0,835 kg/L, cette consommation équivaut à environ 5,102 kg pour 100km.

113 Pour les voitures à pile à combustible, la consommation est d'environ 2,8kg pour parcourir une distance de 100km. Cette
114 valeur est nettement inférieure à celle des véhicules essence et diesel [6].

115 Une pile à combustible nécessite environ 40% moins de carburant pour parcourir la même distance comparativement à un
116 moteur thermique [1].

117 F. Rendement

118 Sur 100 watts d'électricité utilisés pour produire de l'hydrogène, seulement environ 38 watts sont effectivement convertis en
119 énergie propulsive dans une voiture à hydrogène [3]. Cette faible efficacité est due aux pertes énergétiques durant les processus
120 d'électrolyse, de compression, de stockage de l'hydrogène, et finalement lors de la conversion d'énergie dans la pile à
121 combustible. D'autre part, une voiture électrique offre un rendement bien plus élevé, environ 80% de l'électricité stockée dans
122 la batterie est effectivement convertie en énergie propulsive [3].

123 En ce qui concerne les moteurs thermiques :

- 124 • Les moteurs à essence atteignent un rendement maximal d'environ 36 %. Cela signifie que seulement 36 % de l'énergie
125 contenue dans l'essence est convertie en énergie motrice, le reste étant perdu principalement sous forme de chaleur [4].
- 126 • Les moteurs Diesel, quant à eux, sont légèrement plus efficaces avec un rendement maximal d'environ 42 %. Cela
127 s'explique par la combustion plus complète du diesel et le cycle thermodynamique légèrement différent des moteurs
128 Diesel [4].

129 G. Résumé du comparatif des caractéristiques

130 Les caractéristiques détaillées dans les paragraphes ci-dessus sont résumées dans le tableau de comparatif Table 1.
131 Comparatif : moteur à combustion interne / pile à combustible, et les scores d'évaluation sont détaillés dans Table 2.
132 Echelle d'évaluation des performances

133 TABLE 1. COMPARATIF : MOTEUR A COMBUSTION INTERNE / PILE A COMBUSTIBLE

Caractéristiques	Pile à combustible	Score	Moteur thermique	Score
Consommation	Environ 2,8Kg H ₂ /100km	1	Essence : Environ 7,54l/100km (=5,617kg/100km) Diesel : Environ 6,11l/100km (=5,102kg/100km)	3
REX Fiabilité	Manque de recul pour une évaluation complète	2	Elevée, grâce à des années d'optimisation et d'améliorations technologiques	4
Emissions de fabrication	9,7 tonnes CO ₂ e par véhicule	3	Environ 5,5 tonnes CO ₂ e par véhicule	2
Emissions d'utilisation	79 gCO ₂ e/km (électrolyse), 197 gCO ₂ e/km (vaporemformage)	1	214gCO ₂ e/km (moyenne pour moteurs à combustion interne)	3

134 Les caractéristiques sont évaluées selon une échelle de cinq niveaux de performance, allant de 'Nul' à 'Très Elevé'.
135

136 TABLE 2. ECHELLE D'ÉVALUATION DES PERFORMANCES
137

Niveau de Performance	Score	Détail
Nul	0	Performance extrêmement faible
Très Faible	1	Performance Faible
Moyen	2	Performance standard ou moyenne
Elevé	3	Performance supérieure à la moyenne
Très Elevé	4	Performance exceptionnelle

138 III. ANALYSE DES RISQUES 139

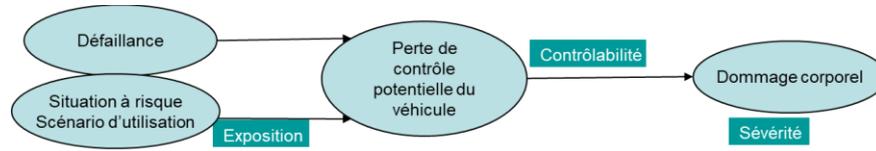
140 A. HARA

141 L'HARA (Hazard Analysis and Risk Assessment) est une analyse qui permet d'identifier les événements redoutés, de les
142 hiérarchiser et de déterminer les objectifs de sécurité. L'objectif étant d'anticiper les situations dangereuses et de prendre en
143 compte des mesures préventives pour garantir la sécurité des personnes et de l'environnement.

144 1) Approche fonctionnelle

145 A partir des différentes fonctions du système, l'approche fonctionnelle de l'HARA permet d'identifier les scénarios à risque
 146 ainsi que leurs effets, il est possible de déduire en conséquence les événements redoutés et d'assigner une cotation ASIL.

147 Dans la norme ISO26262, les 4 niveaux de gravité (Severity de 0 à 3) dépendent des dommages que le comportement
 148 dangereux peut engendrer sur au moins une personne, le critère d'exposition est coté de E1 à E4, le troisième critère est la
 149 Contrôlabilité. Elle s'évalue de C0 (contrôlable en général) à C3 (difficilement contrôlable ou impossible). Le niveau d'ASIL
 150 est alors déterminé en se référant au tableau suivant de la Fig. 3. Extrait de l'ISO 26262 - Table des ASIL :



		C1	C2	C3
S1	E1	QM	QM	QM
	E2	QM	QM	QM
	E3	QM	QM	A
	E4	QM	A	B
S2	E1	QM	QM	QM
	E2	QM	QM	A
	E3	QM	A	B
	E4	A	B	C
S3	E1	QM	QM	A
	E2	QM	A	B
	E3	A	B	C
	E4	B	C	D

Fig. 3. Extrait de l'ISO 26262 - Table des ASIL

151
152

153 « QM » se réfère au niveau de gestion de la qualité sans exigences spécifiques de sécurité, et les niveaux « A », « B », « C »
 154 et « D » indiquent différents niveaux de criticité en sécurité fonctionnelle dans l'industrie automobile, avec "A" représentant le
 155 niveau de sécurité fonctionnelle le plus bas et « D » le plus élevé.

156 Parmi les événements redoutés identifiés sur un véhicule à hydrogène, voici quelques exemples (non exhaustifs) dans Table
 157 3. Liste des événements redoutés identifiés par une HARA sur un véhicule à hydrogène qui impactent la sécurité :

158

TABLE 3. LISTE DES EVENEMENTS REDOUTES IDENTIFIES PAR UNE HARA SUR UN VEHICULE A HYDROGENE

Événement Redouté
Le système n'est pas en mesure de transmettre correctement l'énergie électrique à haute tension, ce qui entraîne une surchauffe le système et le risque d'un incendie d'origine électrique.
Le système soumet une personne qui accède au compartiment moteur à un choc électrique (électrocution/électrisation - par exemple, un opérateur de maintenance ou un utilisateur lors d'un contrôle de niveau de liquide de refroidissement, de filtre, de la batterie, etc.).
Le système évacue de la chaleur sur l'opérateur de maintenance, pouvant potentiellement causer des brûlures graves.
Le système présente une incapacité à dissiper efficacement la chaleur, ce qui provoque une surchauffe et peut déclencher un incendie.
Le système subit une fuite d'hydrogène s'accumulant en se stratifiant sur un point haut de son environnement jusqu'à l'apparition d'une énergie d'activation suffisante pour entraîner une explosion.
Le système subit une fuite d'hydrogène provoquant la création d'une flamme en raison de la présence d'un initiateur, conduisant ainsi à un incendie.
Le système ne parvient pas à utiliser efficacement l'énergie électrique à basse tension, ce qui entraîne une surchauffe et un risque d'incendie d'origine électrique.
Le système est soumis à une pression excessive entraînant l'éclatement d'éléments constitutifs du système et leur projection
Etc...

159

160 2) Approche « Utilisation incorrecte » : Conséquences des actions erronées de l'utilisateur

161 Lorsqu'on réalise l'HARA des utilisations incorrectes, on constate une récurrence des mêmes événements redoutés identifiés
 162 par l'HARA fonctionnelle, parmi les événements redoutés spécifiques aux utilisations incorrectes, on trouve par exemple : "La

163 consommation totale d'oxygène de l'environnement confiné par le système, pouvant entraîner une asphyxie de
164 l'utilisateur/opérateur si le véhicule reste allumé pendant une longue période."

165 3) *Approche menace/agression : conséquences des interactions avec l'environnement du système*

166 Lorsqu'on réalise l'HARA des utilisations incorrectes, on constate une récurrence des mêmes Evénements Redoutés
167 identifiés par l'HARA fonctionnelle, parmi les événements redoutés spécifiques aux menaces et agressions, on trouve par
168 exemple (liste non exhaustive) dans Table 4. Liste des événements redoutés résultants des menaces et agressions :

169 TABLE 4. LISTE DES EVENEMENTS REDOUTES RESULTANTS DES MENACES ET AGRSSIONS

Evénement redouté
La consommation totale d'oxygène de l'environnement confiné par le système, pouvant entraîner une asphyxie de l'utilisateur/opérateur.
Le système émettait un niveau de bruit excessif pouvant entraîner des acouphènes chez l'utilisateur/opérateur.
Etc...

170 4) *Comparaison des risques entre véhicules thermiques et hydrogène*

171 Les événements redoutés identifiés dans les tableaux 3 et 4 spécifiques à un véhicule à hydrogène, diffèrent des événements
172 redoutés d'un véhicule thermique en plusieurs points.

173 Les principales différences résident dans :

- 174 • La transmission de l'énergie électrique à haute tension (généralement autour de 300-350V, elle est ensuite élevée
175 à la tension du réseau de bord du véhicule 400V pour une voiture), pouvant entraîner une surchauffe du système
176 et un risque d'incendie dans un véhicule à hydrogène, contrairement aux véhicules thermiques dont les risques
177 électriques sont limités à la basse tension (principalement 12V).
- 178 • L'état gazeux, la faible taille de ces molécules, son énergie d'activation très faible et la volatilité de l'hydrogène,
179 l'amène naturellement à traverser les éléments solides par perméation et à se concentrer dans des zones hautes.
180 Ainsi, le risque d'atteindre les conditions nécessaires à l'inflammation voire l'explosion d'un mélange entre l'H2
181 et l'O2 sont bien plus facilement remplies que pour l'essence venant des véhicules thermiques. De plus, le gaz
182 étant incolore et inodore, contrairement aux vapeurs d'essence, sa détection en est d'autant plus difficile.
- 183 • Le risque d'anoxie, bien qu'existant également sur les véhicules thermiques, est bien plus impactant dans les
184 systèmes hydrogènes : en effet, là où un comportement négligeant (s'endormir dans son véhicule, dans un espace
185 clos non ventilé, moteur allumé ; "oubli" d'un enfant en bas âge dans le véhicule), est nécessaire pour générer un
186 risque sur un véhicule thermique, une fuite d'hydrogène, en raison de ses propriétés citées ci-dessus, peut réduire
187 le taux d'oxygène sous le seuil d'anoxie en quelques minutes, sans possibilité de détection pour le conducteur ou
188 ses passagers.

189 B. *Principes de sécurisation*

190 Après avoir mené les analyses préliminaires de risques (HARA), il devient impératif de mettre en place des principes de
191 sécurisations afin de faire face aux risques identifiés.

192 Dans cette phase, chaque risque identifié est associé à un objectif de sécurité (Safety Goal) visant à le prévenir, et les
193 différentes exigences fonctionnelles nécessaires pour le couvrir sont déduites à partir de cet objectif de sécurité, des exigences
194 techniques découlent de chaque exigence fonctionnelle.

195 Ci-dessous dans Table 5. Liste des principes de sécurisation un extrait des principes de sécurisation :

196 TABLE 5. LISTE DES PRINCIPES DE SECURISATION

Principe de sécurisation
La conception du système pile à combustible doit garantir une robustesse mécanique de la ligne H2 antérieure à la pile afin d'éviter les fuites de H2 à l'extérieur du système
La conception du système pile à combustible doit garantir une robustesse mécanique de la ligne H2 postérieure à la pile afin d'éviter les fuites de H2 à l'extérieur du système
La conception du système pile à combustible doit garantir une robustesse mécanique du corps de la pile afin d'éviter les fuites de H2 à l'intérieur du système
Déclencher l'état de sécurité en cas de concentration de H2 supérieure au seuil de sécurité.
Le système pile à combustible doit s'assurer de ne pas relâcher de concentration de H2 dangereuse à l'extérieur du véhicule
Mesurer le courant/tension du circuit haute tension et déclencher l'état de sécurité en cas de mesure anormale
Le système pile à combustible doit garantir l'évacuation des calories produites par la pile et ses composants HT en contrôlant le débit et la température du circuit de refroidissement et en déclenchant l'état de sécurité en cas de mesure anormale
Etc...

1) HAZOP

La méthode HAZOP (HAZard and OPerability) est l'une des approches les plus répandues pour l'analyse des risques industriels et utilisée à travers divers secteurs tels que la chimie, la pharmacie, l'agroalimentaire, le pétrole et le gaz, ainsi que le nucléaire.

Dans le contexte de l'analyse des risques liés aux véhicules à pile à combustible, la méthode HAZOP a été initialement considérée en raison de son orientation chimique pour couvrir les risques liés à la partie fluide (H2, air et eau). Cependant, elle a finalement été écartée en raison de ses limites perçues dans le secteur automobile suite à plusieurs tentatives de déploiement. Ainsi, l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) couramment utilisée dans le cadre de la démarche l'ISO 26262 reste la méthode privilégiée des industriels pour traiter la Safety des systèmes liés à l'hydrogène.

2) Méthode AMDEC issue de l'application de l'ISO 26262

L'ISO 26262 (« Véhicules routiers - Sécurité fonctionnelle ») est une norme ISO émergente pour les systèmes de sécurité dans les véhicules routiers à moteur. La mise en œuvre de cette norme permet de garantir la sécurité fonctionnelle des systèmes électrique/électronique dans les véhicules automobiles, ce standard étant une adaptation de la norme CEI 61508 prenant en compte les spécificités de ce secteur [7]. Son adoption est justifiée par sa pertinence directe pour l'industrie automobile, offrant un cadre complet pour l'identification, l'évaluation et la gestion des risques liés à la sécurité.

En complément de l'ISO 26262, une étude de durabilité est souvent entreprise pour évaluer la tenue mécanique des composants, en particulier pour anticiper et prévenir les risques de fuites afin de garantir une évaluation exhaustive des risques et une conception sécurisée des véhicules à hydrogène.

L'application d'une méthodologie AMDEC AIAG-VDA est majoritairement privilégiée pour assurer l'analyse complète des risques liés au dysfonctionnement du système de Pile à Combustible par rapport à l'HAZOP. Cette méthodologie est une approche structurée et standardisée de l'Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC), conjointement par l'Automotive Industry Action Group (AIAG) et l'Association of the German Automotive Industry (VDA), détaillée dans le guide de la Fig. 4. Guide pour la méthodologie AMDEC AIAG-VDA. Bien que l'approche HAZOP a été envisagée initialement, l'application de la méthodologie AMDEC AIAG-VDA a finalement été retenue pour assurer l'analyse complète des risques liés au dysfonctionnement du système Pile à Combustible, en raison de son utilisation plus courante dans le domaine automobile et de sa meilleure capacité à identifier les scénarios de dysfonctionnements possibles.



Fig. 4. Guide pour la méthodologie AMDEC AIAG-VDA

V. COMPLEMENTS APPORTES PAR LES ETUDES DE DURABILITE

L'ISO 26262 est prévue principalement pour assurer la sécurité fonctionnelle des systèmes électroniques dans le domaine automobile, or, comme nous l'avons vu précédemment, les risques inhérents à l'utilisation de systèmes hydrogènes présentent des composantes mécaniques importantes, en particulier la robustesse contre l'apparition de fuites.

Afin d'assurer que l'ensemble des éléments mécaniques garantissent une étanchéité suffisante tout au long de la durée de vie du système, des études de durabilité sont pratiquées :

- Méthode Contrainte – Résistance => permet d'assurer la tenue des composants du système face aux sollicitations du profil de mission prévu
- Dimensionnement fiabiliste => permet de définir les mécanismes de défaillances physiques des composants ainsi que leur profil (comment ils se produisent – sollicitations, temps...), de déterminer les essais permettant de valider la tenue mécanique des composants et de les réaliser pour obtenir les données exploitables sur la fiabilité à long terme des composants et de garantir leur résistance sur l'ensemble du cycle de vie du système.

L'apport de cette démarche permet d'allouer la couverture d'une partie de l'objectif ASIL par la robustesse mécanique du système et ainsi de relâcher la contrainte sur la partie électronique lorsque cela est pertinent.

241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278

VI. CONCLUSION

La transition vers une source d'énergie plus écologique est désormais une nécessité et le passage à l'hydrogène offre une solution prometteuse. Cependant, il ne faut pas négliger l'empreinte carbone potentielle de l'ensemble du cycle de vie de cette technologie. Par conséquent, il est important d'opter pour les méthodes de production d'hydrogène respectueuses de l'environnement, telles que l'électrolyse de l'eau.

En outre, la sécurité constitue un aspect essentiel à prendre en compte lors du déploiement de chaque nouvelle technologie. Il est ainsi primordial d'anticiper les risques afin de mettre en place des stratégies efficaces pour les gérer. C'est sur ce point que SECTOR intervient grâce à son expertise de plus de 30 ans dans le secteur automobile, en contribuant à la réalisation des différentes études de sûreté et de durabilité afin de faciliter la transition vers un avenir plus écologique. Le retour d'expérience des démarches de sécurité réalisées par SECTOR sur les véhicules thermiques ont permis d'identifier et de traiter les risques liés aux nouveaux modes de propulsion tout en assurant une cohérence entre les démarches appliquées, permettant d'établir un premier comparatif des principes de sécurisation des différentes technologies de véhicules et des impacts associés.

REMERCIEMENTS

Nous exprimons notre gratitude à tous les collaborateurs de SECTOR GROUP qui ont contribué aux diverses études de sécurité menées sur les projets liés aux véhicules à hydrogène, lesquelles ont permis au groupe d'approfondir ses compétences et de les intégrer à sa gamme de projets. Enfin, nous remercions l'ensemble des membres du comité de programme LM24 pour nous avoir offert la possibilité de présenter nos travaux.

REFERENCES

- [1]. https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2018/12/10/six-chiffres-pour-comprendre-l-ampleur-de-la-pollution-automobile_5395374_4355770.html
- [2]. Norme ISO 26262 : 2018 « Véhicules routiers - Sécurité fonctionnelle »
- [3]. <https://www.futura-sciences.com/tech/questions-reponses/voiture-electrique-voiture-electrique-voiture-hydrogene-laquelle-plus-ecologique-16206/>
- [4]. <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/transports/les-vehicules-essence-et-diesel#:~:text=Dans%20des%20conditions%20optimales%20de,42%20%25%20pour%20un%20moteur%20Diesel.>
- [5]. <https://www.sami.eco/blog/bilan-carbone-voiture-hydrogene#:~:text=La%20batterie%2C%20le%20r%C3%A9servoir%20%20C3%A0,de%204%20tonnes%20de%20CO2e.&text=de%2023%25%20les%20%C3%A9missions%20de,est%20issu%20de%20l'%C3%A9lectrolyse.>
- [6]. <https://fr.statista.com/statistiques/486554/consommation-de-carburant-moyenne-voiture-france/#:~:text=En%202021%2C%20une%20voiture%20particulier%20C3%A8re,11%20pour%20les%20voitures%200diesel.>
- [7]. https://fr.wikipedia.org/wiki/ISO_26262
- [8]. SECTOR : divers projets confidentiels de systèmes de véhicules à hydrogène