



Commission économique pour l'Europe

Comité des transports intérieurs

**Forum mondial de l'harmonisation
des Règlements concernant les véhicules****190^e session**

Genève, 20-22 juin 2023

Point 14.2.1 de l'ordre du jour provisoire

Accord de 1998 :**Examen et mise aux voix par le Comité exécutif des éventuels projets
de RTM ONU ou d'amendements à des RTM ONU existants****Proposition de nouveau RTM ONU, s'il y a lieu****Proposition d'amendements à un RTM ONU, s'il y a lieu****Proposition d'amendement 1 au Règlement technique
mondial ONU n° 13, phase 2 (Véhicules à hydrogène
et à pile à combustible)****Communication du Groupe de travail de la sécurité passive***

Le texte ci-après, recommandé par le Groupe de travail de la sécurité passive (GRSP) à sa soixante-douzième session (ECE/TRANS/WP.29/GRSP/72, par. 8), est fondé sur le document ECE/TRANS/WP.29/GRSP/2022/16, tel que modifié par l'annexe II du rapport. Il est soumis au Forum mondial de l'harmonisation des Règlements concernant les véhicules (WP.29) et au Comité exécutif de l'Accord de 1998 (AC.3) pour examen à leurs sessions de juin 2023.

* Conformément au programme de travail du Comité des transports intérieurs pour 2023 tel qu'il figure dans le projet de budget-programme pour 2023 (A/77/6 (Sect. 20), tableau 20.6), le Forum mondial a pour mission d'élaborer, d'harmoniser et de mettre à jour les Règlements ONU en vue d'améliorer les caractéristiques fonctionnelles des véhicules. Le présent document est soumis en vertu de ce mandat.



Table des matières, lire :

« Table des matières

Page

I.	Énoncé de l'argumentation technique justifiant le Règlement	
A.	Introduction	
B.	Étendue des travaux pour la phase 1 et la phase 2	
C.	Description d'un véhicule à hydrogène type.....	
1.	Description du véhicule.....	
2.	Système de ravitaillement en hydrogène	
3.	Système de stockage d'hydrogène.....	
4.	Système d'alimentation en hydrogène.....	
5.	Système de pile à combustible	
6.	Système d'entraînement électrique et de gestion de l'énergie.....	
7.	Moteurs à combustion interne (MCI)	
D.	Argumentation concernant le domaine d'application, les définitions et l'applicabilité des prescriptions	
1.	Argumentation concernant la section 2 (Domaine d'application)	
2.	Argumentation concernant les paragraphes 3.9 et 3.48 (Définitions de la durée de service et date de retrait du service)	
3.	Argumentation concernant la section 4 (Applicabilité des prescriptions)	
E.	Argumentation concernant la section 5 (Prescriptions fonctionnelles).....	
1.	Prescriptions d'essai et considérations de sécurité s'appliquant au système de stockage d'hydrogène comprimé	
2.	Prescriptions s'appliquant au système d'alimentation du véhicule et impératifs de sécurité.....	
F.	Argumentation concernant les procédures d'essai du système de stockage et du système d'alimentation en carburant.....	
1.	Argumentation concernant les essais d'intégrité du système de stockage et du système d'alimentation en carburant	
2.	Argumentation concernant le paragraphe 6.2 : Procédures d'essai pour les systèmes de stockage d'hydrogène comprimé	
G.	Argumentation concernant les prescriptions facultatives : Véhicules équipés d'un système de stockage d'hydrogène liquéfié	
1.	Informations de base sur les systèmes de stockage d'hydrogène liquéfié	
2.	Argumentation concernant les prescriptions de qualification de la conception du système de stockage d'hydrogène liquéfié énoncées au paragraphe 7.2	
3.	Argumentation concernant les prescriptions de qualification de la conception du système d'alimentation en carburant du véhicule (hydrogène liquéfié)	
4.	Argumentation concernant les procédures d'essai applicables aux systèmes de stockage d'hydrogène liquéfié	
5.	Argumentation concernant le paragraphe 7.5 : Procédure d'essai pour la mesure des concentrations après un choc pour les véhicules équipés d'un système de stockage d'hydrogène liquéfié	

H.	Prescriptions nationales concernant la compatibilité des matériaux (y compris la résistance à la fragilisation par l'hydrogène) et la conformité de production	
1.	Compatibilité des matériaux et résistance à la fragilisation par l'hydrogène	
2.	Prescriptions nationales complémentaires par rapport aux prescriptions du RTM ONU.....	
I.	Thèmes à prendre en compte pour la phase suivante d'élaboration du RTM ONU pour les véhicules à hydrogène	
J.	Règlements, directives et normes internationales existantes	
1.	Intégrité du système d'alimentation en carburant du véhicule	
2.	Système de stockage du carburant.....	
K.	Avantages et coûts du RTM ONU	
L.	Considérations relatives à l'interopérabilité	
M.	Évaluation des matériaux destinés aux systèmes à hydrogène	
N.	Essai de fissuration par corrosion sous contrainte en présence de gaz humide pour les alliages d'aluminium.....	
O.	Tolérances indicatives pour les prescriptions de qualification du système de stockage d'hydrogène comprimé	
II.	Texte du Règlement	
1.	Objet	
2.	Domaine d'application.....	
3.	Définitions	
4.	Applicabilité des prescriptions.....	
5.	Prescriptions fonctionnelles	
5.1	Système de stockage d'hydrogène comprimé	
5.2	Système d'alimentation en carburant du véhicule	
6.	Conditions et procédures d'essai	
6.1	Essais de conformité : intégrité du système d'alimentation en carburant.....	
6.2	Procédures d'essai pour un système de stockage d'hydrogène comprimé	
7.	Véhicules équipés d'un système de stockage d'hydrogène liquéfié	
7.1	Prescriptions facultatives applicables aux véhicules équipés d'un système de stockage d'hydrogène liquéfié.....	
7.2	Prescriptions de qualification de la conception du système de stockage d'hydrogène liquéfié	
7.3	Intégrité du système d'alimentation en carburant du système de stockage d'hydrogène liquéfié	
7.4	Procédures d'essai de qualification de la conception du système de stockage d'hydrogène liquéfié	
7.5	Procédures d'essai de vérification de l'intégrité du système de stockage d'hydrogène liquéfié	».

Partie I, Énoncé de l'argumentation technique justifiant le Règlement, lire :

« I. Énoncé de l'argumentation technique justifiant le Règlement

A. Introduction

1. Dans le cadre du débat en cours sur la nécessité de rechercher de nouvelles sources d'énergie et de réduire les émissions de gaz à effet de serre, les industriels, dans le monde entier, étudient la possibilité d'utiliser divers carburants de substitution, y compris le gaz naturel comprimé, le gaz propane liquéfié et l'hydrogène. L'hydrogène est apparu comme l'un des carburants de substitution les plus séduisants du fait qu'il permet de réduire pratiquement à zéro les émissions d'un véhicule. Vers la fin de la décennie 1990, la Communauté européenne a affecté des ressources à l'étude de cette question dans le cadre du Projet européen intégré de recherche sur l'hydrogène (EIHP), et a transmis les résultats de ces travaux, à savoir deux propositions concernant respectivement l'hydrogène gazeux comprimé et l'hydrogène liquéfié, au secrétariat de la CEE. Dans le cadre du projet de suivi EIHP2, des discussions ont été lancées sur la possibilité d'établir un règlement technique mondial pour les véhicules à hydrogène. Quelques années plus tard, les États-Unis d'Amérique ont jeté les bases d'une initiative mondiale, le Partenariat international pour l'économie de l'hydrogène, et ont invité la Chine, le Japon, la Fédération de Russie, l'Union européenne et de nombreux pays à participer à cet effort.

2. Depuis plusieurs décennies, des scientifiques, des chercheurs et des économistes attirent l'attention sur le potentiel de l'hydrogène, aussi bien sous forme gazeuse comprimée que sous forme liquide, en tant que carburant automobile pouvant remplacer l'essence et le gazole. La mise en place de procédures sûres d'utilisation de l'hydrogène en tant que carburant est indispensable à une transition effective vers une économie mondiale basée sur l'hydrogène. Par nature, tous les combustibles présentent un degré de danger inhérent dû à leur énergie interne. La sécurité de l'utilisation de l'hydrogène, en particulier sous forme gazeuse comprimée, consiste à prévenir les accidents graves résultant de la présence simultanée de combustible, d'air et d'une source d'inflammation ainsi que les risques d'origine électrique et liés à la pression.

3. Les gouvernements ont conclu à la nécessité d'élaborer des règlements et des normes en tant que condition clef de la commercialisation des véhicules à hydrogène. Ces règlements et normes permettront de surmonter les obstacles techniques au commerce, d'encourager les investissements des industriels dans la fabrication de véhicules à hydrogène et de faciliter l'acceptation de ce mode de propulsion dans le public, grâce à la mise en place d'une base systématique et objective d'évaluation et de notification du risque associé à l'utilisation des véhicules à hydrogène, que ce soit vis-à-vis du grand public, des consommateurs, du personnel des services d'urgence ou des organismes d'assurances.

4. Le présent Règlement technique mondial de l'ONU (RTM ONU) relatif aux véhicules à hydrogène et à pile à combustible a été élaboré au sein du Forum mondial de l'harmonisation des Règlements concernant les véhicules (WP.29) du Comité des transports intérieurs (CTI) de la CEE. Il répond aux objectifs suivants : établir un RTM ONU s'appliquant aux véhicules fonctionnant à l'hydrogène qui : i) permette d'atteindre ou de dépasser les niveaux de sécurité comparables s'appliquant aux véhicules classiques fonctionnant à l'essence ; et ii) énonce des prescriptions fonctionnelles et ne fasse pas entrave à l'évolution technologique future.

5. Le 27 juin 2013, le RTM ONU n° 13 (ECE/TRANS/180/Add.13) a été établi sous l'égide de l'Allemagne, du Japon et des États-Unis d'Amérique. Il s'applique à tous les véhicules à hydrogène des catégories 1-1 et 1-2 dont le poids total en charge (PTC) est inférieur ou égal à 4 536 kg. Le RTM ONU se compose de trois sections principales : système haute tension, système de stockage d'hydrogène et système d'alimentation en hydrogène du véhicule. Il contient un ensemble de dispositions réparties en deux catégories : en utilisation et après un choc.

6. Les représentants du Japon, de la République de Corée et de l'Union européenne ont soumis une proposition visant à autoriser l'élaboration de la phase 2 du Règlement technique mondial ONU (RTM ONU) n° 13 par le groupe de travail informel des véhicules à hydrogène et à pile à combustible – sous-groupe des questions de sécurité (HFCV-SGS) (ECE/TRANS/WP.29/2017/56-ECE/TRANS/WP.29/AC.3/49). Cette autorisation a été transmise au Groupe de travail de la sécurité passive (GRSP), qui a indiqué que la phase 2 devrait commencer immédiatement après l'approbation de l'autorisation par le WP.29 et le Comité exécutif de l'Accord de 1998 (AC.3) à leurs sessions de mars 2017. Les travaux du sous-groupe des questions de sécurité chargé de la phase 2 devaient être achevés au plus tard à la fin de l'année 2020. À leurs sessions de novembre 2020 et de mars 2022, le WP.29 et l'AC.3 ont prolongé le mandat du groupe de travail, qui court jusqu'en décembre 2022.

B. Étendue des travaux pour la phase 1 et la phase 2

Phase 1 : Plan d'action pour l'élaboration du Règlement technique mondial

7. La technologie des véhicules fonctionnant à l'hydrogène étant encore émergente, le Comité exécutif de l'Accord de 1998 (WP.29/AC.3), qui relève du Forum mondial, a conclu que la participation active des chercheurs était un élément essentiel dans le cadre de cet effort. Sur la base des règlements et normes existants pour les véhicules à hydrogène et à pile à combustible et les véhicules classiques, il est nécessaire d'étudier et de déterminer : 1) les principales différences en matière de sécurité et de problèmes environnementaux entre les véhicules classiques et les véhicules à hydrogène ; et 2) les bases techniques justifiant les prescriptions à appliquer aux véhicules à hydrogène.

8. En juin 2005, le WP.29/AC.3 a accepté une proposition de l'Allemagne, des États-Unis d'Amérique et du Japon concernant la meilleure façon de gérer le processus d'élaboration d'un RTM ONU sur les véhicules à hydrogène (ECE/TRANS/WP.29/AC.3/17). Conformément au processus convenu, l'AC.3 a approuvé un plan d'action pour l'élaboration d'un RTM ONU soumis par les responsables techniques. Deux sous-groupes ont été constitués pour étudier les aspects du RTM ONU relatifs à la sécurité et à la protection de l'environnement. Le sous-groupe des questions de sécurité (HFCV-SGS) devait rendre compte au GRSP. La présidence du groupe a été confiée au Japon et aux États-Unis au cours de l'été 2007. Le sous-groupe des questions environnementales (HFCV-SGE) était présidé par la Commission européenne et il devait rendre compte au Groupe de travail de la pollution et de l'énergie (GRPE). Afin d'assurer une bonne communication entre les sous-groupes et une liaison continue avec le WP.29 et l'AC.3, le directeur de projet (Allemagne) devait coordonner et gérer les divers aspects des travaux, de manière que le plan d'action concerté soit mis en œuvre comme prévu et que les étapes et échéances de la mise en œuvre soient fixées et respectées tout au long de l'élaboration du RTM ONU. Le RTM ONU devait traiter, dans sa première phase, des piles à combustible, des moteurs à combustion interne, de l'hydrogène gazeux comprimé (CGH₂) et de l'hydrogène liquéfié (LH₂). Lors d'une session ultérieure du WP.29, le plan d'action relatif au RTM ONU a été soumis à l'AC.3 et approuvé par ce dernier (ECE/TRANS/WP.29/2007/41).

9. Pour permettre l'élaboration du RTM ONU dans le contexte de l'évolution des technologies de l'hydrogène, le groupe tripartite propose de procéder en deux phases :

a) Phase 1 (RTM ONU concernant les véhicules à hydrogène) :

Élaboration d'ici à 2010 d'un RTM ONU sur les véhicules à hydrogène fondé sur une combinaison de prescriptions portant sur les composants, les sous-systèmes et l'ensemble du véhicule. S'agissant des essais de choc, il est précisé dans le RTM ONU que chaque Partie contractante applique ses propres procédures d'essai et utilise comme critère d'essai le débit de fuite maximal admissible pour l'hydrogène adopté d'un commun accord. La nouvelle réglementation japonaise ainsi que tous autres travaux de recherche et résultats d'essais disponibles seront pris comme base pour l'élaboration de cette première phase du RTM ONU ;

- b) Phase 2 (Évaluation des technologies futures et harmonisation des essais de choc) :

Modification du RTM ONU de manière à ce qu'il garde sa validité compte tenu des nouveaux résultats de recherches et de l'état de la technologie après la phase 1. Étude de la manière d'harmoniser les prescriptions applicables aux véhicules à hydrogène et à pile à combustible en matière d'essais de choc, s'agissant notamment des essais de choc réalisés sur l'ensemble du véhicule pour tester l'intégrité du système d'alimentation en carburant.

10. Le RTM ONU comprendra les éléments principaux suivants :

- a) Prescriptions relatives aux composants et sous-systèmes (non basées sur des essais de choc) :

Évaluation des prescriptions non basées sur des essais de choc par réexamen des analyses et évaluations faites pour les justifier. Ajout ou suppression de prescriptions ou modification au besoin des procédures d'essai, en fonction des évaluations existantes ou d'évaluations rapides effectuées par les Parties contractantes et les autres participants. Il conviendrait d'éviter dans la mesure du possible de formuler des prescriptions de conception détaillées et d'inclure des dispositions non justifiées techniquement. Les efforts devraient porter principalement sur les points suivants :

- i) Prescriptions fonctionnelles s'appliquant aux systèmes de stockage d'hydrogène, aux dispositifs de fermeture à haute pression, aux dispositifs de décompression et aux lignes de carburant, etc. ;
- ii) Prescriptions concernant l'isolation électrique, la sécurité et la protection contre les chocs électriques (en utilisation) ;
- iii) Prescriptions fonctionnelles et autres prescriptions concernant l'intégration de sous-systèmes sur le véhicule ;

- b) Prescriptions applicables à l'ensemble du véhicule :

Évaluation des risques que présentent les différents types de systèmes d'alimentation en carburant dans les divers types d'accidents. Examen et évaluation des analyses et des essais de choc effectués pour quantifier les risques et définir des mesures d'atténuation appropriées pour les véhicules à hydrogène. Les efforts porteront principalement sur :

- i) Les débits de fuite d'hydrogène admissibles en utilisation normale et après un choc. Les valeurs limites autorisées après un choc s'appliquent après l'exécution des essais de choc (avant, latéral et arrière) prévus dans les prescriptions nationales concernant les essais de choc dans chaque juridiction ;
- ii) Les prescriptions applicables en utilisation et après un choc concernant l'isolation électrique et la protection contre les chocs électriques. Les critères de sécurité devant être respectés après un choc s'appliquent après l'exécution des essais de choc (avant, latéral et arrière) prévus dans les prescriptions nationales concernant les essais de choc dans chaque juridiction.

Phase 2 : Étendue des travaux

11. Une prorogation du mandat du groupe de travail informel des véhicules à pile à combustible à hydrogène, sous-groupe des questions de sécurité, soutenue par l'Union européenne, le Japon et la République de Corée, permettrait de s'attaquer aux questions en suspens. La phase 2 des activités devrait débuter immédiatement après l'approbation par le WP.29 et l'AC.3 de l'autorisation susmentionnée à leurs sessions de mars 2017.

12. Le groupe de travail informel se penchera sur les points suivants :
- a) Maintien des éléments définis dans le document ECE/TRANS/WP.29/AC.3/17 ;
 - b) Révision possible du champ d'application pour prendre en compte d'autres classes de véhicules ;
 - c) Prescriptions concernant la compatibilité des matériaux et la résistance à la fragilisation par l'hydrogène ;
 - d) Prescriptions concernant l'embout de remplissage ;
 - e) Modifications d'ordre rédactionnel ou technique apportées à chaque prescription et procédure d'essai ;
 - f) Révisions fondées sur les résultats de recherche communiqués après l'achèvement de la phase 1 – en particulier, recherches traitant des systèmes de stockage d'hydrogène, des essais d'exposition au feu et de la sécurité après un choc ;
 - g) Révision de la pression minimale d'éclatement, définie comme étant inférieure ou égale à 200 % de la pression de service nominale (PSN) ;
 - h) Révisions concernant les nouveaux types de conteneurs tels que les réservoirs modulaires.

C. Description d'un véhicule à hydrogène type

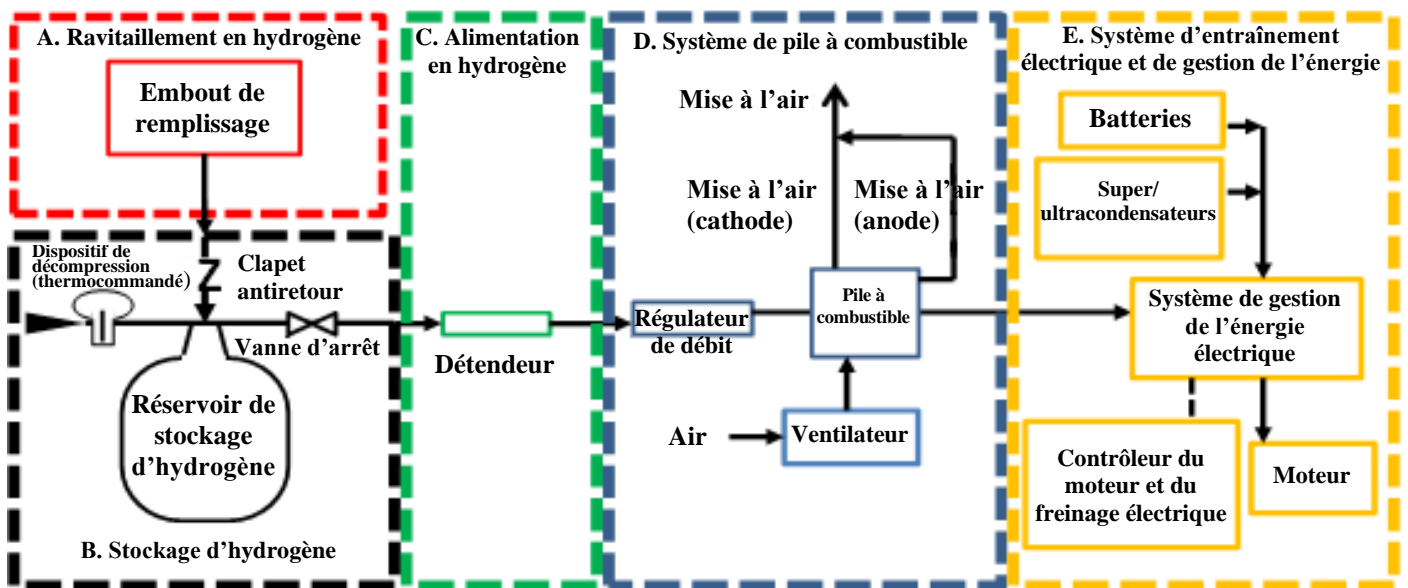
1. Description du véhicule

13. Les véhicules à hydrogène peuvent utiliser soit un moteur à combustion interne, soit des piles à combustible comme source d'énergie. Les véhicules à pile à combustible à hydrogène (HFCV) comportent une chaîne d'entraînement alimentée électriquement par une pile à combustible produisant de l'électricité par voie électrochimique à partir d'hydrogène. En général, les HFCV sont équipés de perfectionnements techniques supplémentaires permettant d'améliorer leur rendement, tels que les systèmes de freinage à récupération qui récupèrent l'énergie cinétique qui serait perdue lors du freinage et la stockent dans une batterie ou dans des ultracondensateurs. Si les caractéristiques des systèmes et les solutions matérielles et logicielles peuvent varier d'un HFCV à l'autre, les principaux systèmes suivants sont communs à la plupart d'entre eux :

- a) Système de ravitaillement en hydrogène ;
- b) Système de stockage d'hydrogène ;
- c) Système d'alimentation en hydrogène ;
- d) Système de pile à combustible ;
- e) Système d'entraînement électrique et de gestion de l'énergie.

14. Un schéma de principe décrivant les interactions fonctionnelles entre les principaux systèmes d'un véhicule à pile à combustible à hydrogène est représenté à la figure 1. Lors du ravitaillement, la source d'hydrogène est raccordée au véhicule par l'embout de remplissage et l'hydrogène est transféré dans le système de stockage d'hydrogène. L'hydrogène peut être stocké sous forme d'hydrogène gazeux comprimé ou d'hydrogène liquéfié. Au démarrage du véhicule, l'hydrogène s'écoule hors du système de stockage d'hydrogène. Des détendeurs et d'autres équipements intégrés au système d'alimentation en hydrogène abaissent la pression au niveau approprié pour le fonctionnement du système de pile à combustible. L'hydrogène subit une réaction électrochimique et se recombine avec l'oxygène (de l'air) dans le système de pile à combustible, ce qui génère de l'énergie électrique. L'électricité haute tension ainsi produite est envoyée au système d'entraînement électrique et de gestion de l'énergie, et sert à alimenter les moteurs d'entraînement électriques ou à charger des batteries ou des ultracondensateurs.

Figure 1
Exemple de schéma de principe des principaux systèmes d'un HFCV



15. Les figures 2 à 4 illustrent les dispositions typiques des composants clés des principaux systèmes d'un véhicule à pile à combustible à hydrogène représentatif. L'embout de remplissage est représenté dans un emplacement typique à l'angle arrière gauche de la voiture particulière, mais sa position peut varier en fonction du type de véhicule. Comme les réservoirs à essence, les réservoirs de stockage d'hydrogène, qu'il s'agisse d'hydrogène gazeux comprimé ou liquéfié, sont habituellement montés transversalement à l'arrière de la voiture particulière, mais d'autres possibilités existent telles que le montage longitudinal dans le tunnel central du véhicule ou sur le toit dans le cas des bus. Les piles à combustible et accessoires sont habituellement placés sous l'habitacle (comme dans l'illustration), ou dans un « compartiment moteur » comme sur les véhicules classiques, avec le système de gestion de l'énergie électrique, le contrôleur des moteurs de traction et les moteurs de traction. Étant donné la dimension et le poids des batteries de traction et des ultracondensateurs, ces composants sont habituellement répartis dans le véhicule de manière à assurer la stabilité du véhicule.

16. Des schémas typiques de la disposition des composants d'un véhicule à hydrogène avec système de stockage d'hydrogène comprimé et pile à combustible sont représentés aux figures 2, 3 et 4.

Figure 2
Exemple de voiture particulière à pile à combustible à hydrogène

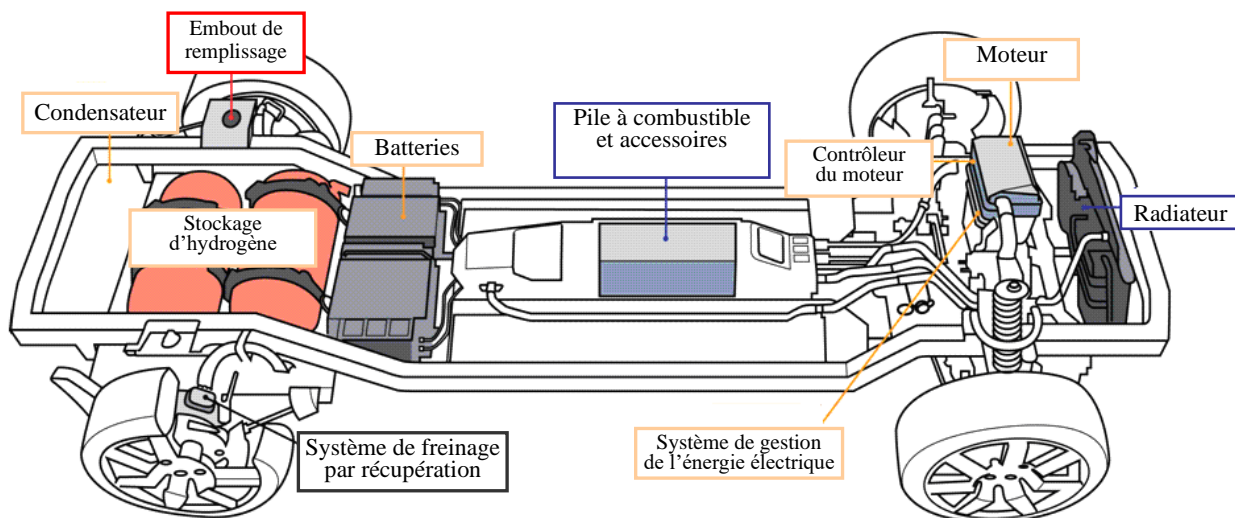


Figure 3
Exemple de bus à pile à combustible à hydrogène

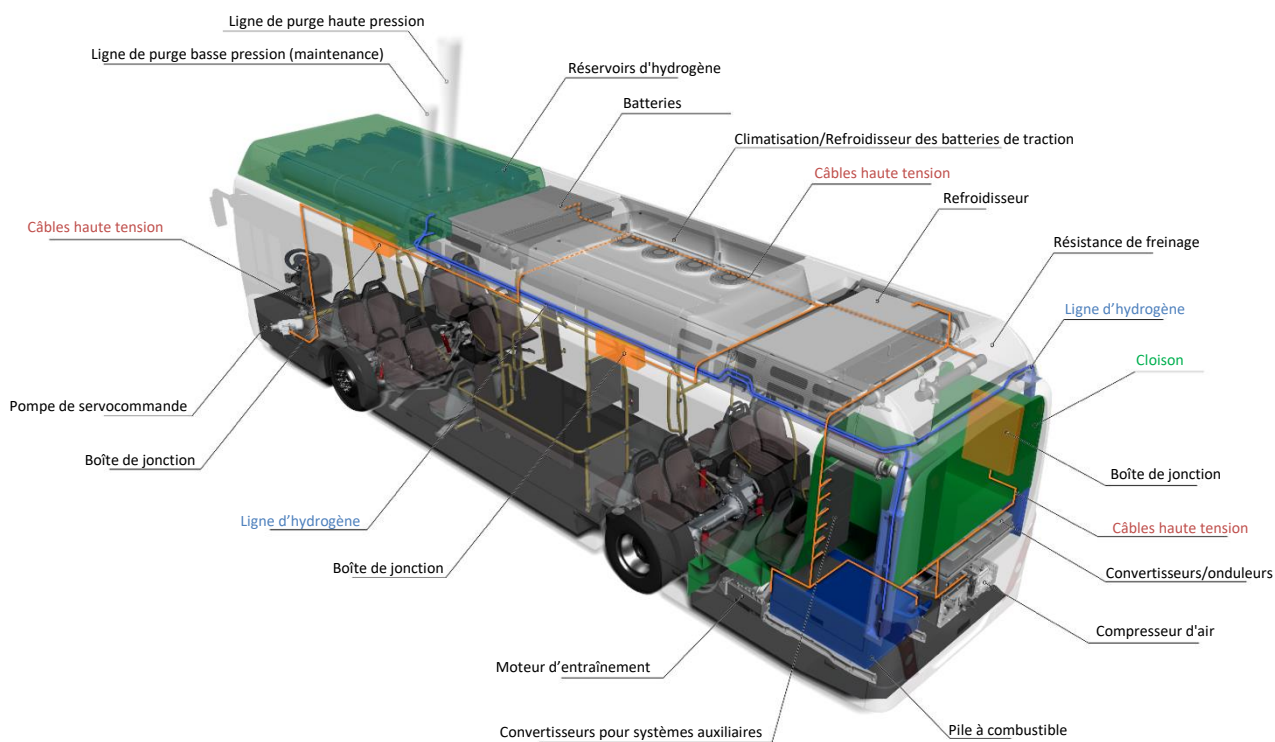
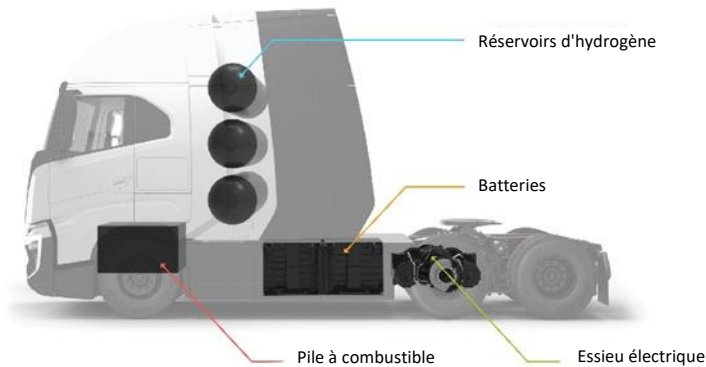


Figure 4
Exemple de camion à pile à combustible à hydrogène



2. Système de ravitaillement en hydrogène

17. Le ravitaillement du véhicule peut se faire en gaz liquéfié ou en gaz comprimé à une station de distribution, selon le mode de stockage de l'hydrogène à bord du véhicule. Actuellement, le ravitaillement se fait le plus souvent avec de l'hydrogène gazeux comprimé, à une pression allant jusqu'à 125 % de la pression de service nominale du véhicule (PSN), pour compenser le réchauffement dû à la compression adiabatique au cours du remplissage.

18. Quel que soit l'état de l'hydrogène, les véhicules sont ravitaillés par l'intermédiaire d'une buse de ravitaillement spéciale qui permet de raccorder le distributeur de la station de distribution et l'embout de remplissage du véhicule de façon à établir un système fermé de transfert de l'hydrogène vers le véhicule. L'embout de remplissage du véhicule comporte un clapet antiretour (ou un autre dispositif empêchant les fuites d'hydrogène depuis le véhicule lorsque la buse de ravitaillement est déconnectée).

3. Système de stockage d'hydrogène

19. Le système de stockage d'hydrogène est constitué de tous les composants qui forment l'enceinte de confinement primaire sous haute pression destinée à retenir l'hydrogène stocké. Les fonctions principales du système de stockage d'hydrogène sont de recevoir l'hydrogène lors du ravitaillement, de contenir l'hydrogène jusqu'à ce qu'il soit utilisé, puis d'alimenter en hydrogène le système de piles à combustible ou le moteur à combustion interne servant à entraîner le véhicule. Actuellement, la forme sous laquelle l'hydrogène est le plus couramment stocké et transporté à bord du véhicule est la forme gazeuse comprimée. L'hydrogène peut aussi être stocké sous forme liquide (en conditions cryogéniques). Chacun des types de système de stockage d'hydrogène est décrit dans les sections qui suivent.

20. D'autres modes de stockage de l'hydrogène, tels que le stockage par cryocompression, seront éventuellement pris en compte dans des révisions futures du présent RTM ONU lorsque ces techniques auront atteint un certain stade de maturité. Le stockage d'hydrogène cryocomprimé (CCH₂) est une forme hybride entre le stockage d'hydrogène liquéfié et le stockage d'hydrogène gazeux comprimé, qui permet de remplir le réservoir aussi bien avec du gaz cryocomprimé qu'avec du gaz comprimé.

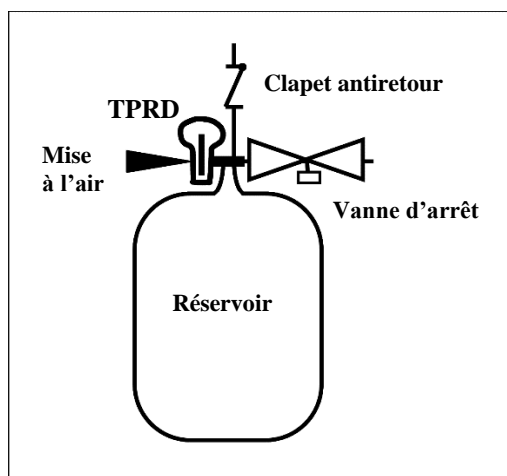
a) *Système de stockage d'hydrogène comprimé*

21. Les composants d'un système typique de stockage d'hydrogène comprimé sont représentés à la figure 5. Le système inclut le réservoir et tous les autres composants qui forment l'« enceinte primaire sous pression » qui empêche l'hydrogène de s'échapper du système. Dans ce cas, les composants ci-après font partie du système de stockage d'hydrogène comprimé :

- a) Le réservoir ;
- b) Le clapet antiretour ;

- c) La vanne d'arrêt ;
- d) Le dispositif de décompression thermocommandé (TPRD).

Figure 5
Système de stockage d'hydrogène comprimé typique



22. Les réservoirs de stockage d'hydrogène servent à emmagasiner le gaz comprimé. Un système de stockage d'hydrogène peut comporter plus d'un réservoir, en fonction de la quantité qui doit être stockée et des contraintes physiques présentées par le véhicule. L'hydrogène carburant a une faible densité énergétique par unité de volume. Afin de surmonter cette limitation, on stocke l'hydrogène à très haute pression dans les réservoirs de stockage d'hydrogène comprimé. Sur les véhicules de recherche actuels (c'est-à-dire antérieurs à 2011), l'hydrogène est couramment stocké à une pression de service nominale de 35 ou 70 MPa, la pression maximale de remplissage étant égale à 125 % de la pression de service nominale (soit 43,8 ou 87,5 MPa respectivement). Au cours de l'opération normale de remplissage « rapide », la pression à l'intérieur des réservoirs peut dépasser de 25 % la pression de service nominale en raison de l'élévation de température causée par la compression adiabatique du gaz. La pression redescend à mesure que la température baisse dans le réservoir après ravitaillement. Par définition, la pression après stabilisation du système est égale à la pression de service nominale lorsque le réservoir est à 15 °C. Différentes valeurs de pression (supérieures ou inférieures aux valeurs actuelles, ou comprises entre celles-ci) seront éventuellement appliquées à l'avenir au fur et à mesure que la commercialisation des techniques évoluera.

23. Les réservoirs sont actuellement construits en matériau composite afin de satisfaire aux conditions de confinement de l'hydrogène à haute pression à un poids acceptable pour une application automobile. La plupart des réservoirs de stockage d'hydrogène à haute pression utilisés sur les véhicules à pile à combustible ou à moteur à combustion interne se composent de deux couches : une enveloppe interne qui empêche les fuites ou la perméation du gaz (habituellement en métal ou en polymère thermoplastique) et une coque extérieure qui assure l'intégrité structurelle (habituellement en métal ou en matériau composite renforcé par des fibres imprégnées de résine thermodurcissable, qui est enroulé autour de l'enveloppe interne étanche).

24. Un réservoir de stockage d'hydrogène peut comporter une seule chambre ou plusieurs chambres raccordées en permanence. Il ne doit pas être possible d'obturer les passages entre ces chambres. Le désassemblage des différents composants d'un réservoir est interdit et doit entraîner le retrait du service définitif du réservoir.

25. Un réservoir peut être équipé d'accessoires, c'est-à-dire des pièces non soumises à la pression qui fournissent au réservoir un appui ou une protection supplémentaire.

26. Au cours du remplissage, l'hydrogène entre dans le système de stockage en traversant un clapet antiretour. Celui-ci évite le reflux de l'hydrogène dans la ligne de remplissage.

27. Une vanne d'arrêt automatique empêche l'hydrogène stocké de sortir du réservoir lorsque le véhicule n'est pas en fonctionnement ou en cas de détection d'une défaillance qui rend nécessaire l'isolement du système de stockage d'hydrogène.

28. En cas d'incendie, des dispositifs de décompression thermocommandés (TPRD) permettent une libération contrôlée du gaz contenu dans les réservoirs de stockage d'hydrogène comprimé, avant que les températures élevées résultant de l'incendie n'affaiblissent les réservoirs et causent un éclatement dangereux. Les TPRD sont conçus pour purger rapidement et totalement les réservoirs. Ils ne permettent pas la refermeture ou la remise en pression des réservoirs. Les réservoirs de stockage et TPRD qui ont été exposés à un incendie doivent être retirés du service et détruits.

b) *Système de stockage d'hydrogène liquéfié*

29. Étant donné que l'expérience de l'utilisation sur route des systèmes de stockage d'hydrogène liquéfié est limitée et concerne uniquement des parcs de voitures de démonstration, il n'y a pas eu d'évaluation approfondie des prescriptions de sécurité ni d'examen poussé des procédures d'essai en vue de déterminer leur applicabilité et leur validité au regard des défaillances connues. C'est pourquoi des prescriptions et procédures d'essai optionnelles pour les véhicules à système de stockage d'hydrogène liquéfié sont présentées dans la section G du présent préambule et dans le paragraphe 7 du texte du Règlement, respectivement, pour que les Parties contractantes étudient leur adoption éventuelle dans les règlements nationaux. En principe, ces prescriptions devraient être considérées comme des prescriptions relevant d'un RTM ONU futur s'appliquant aux véhicules à système de stockage d'hydrogène liquéfié.

4. Système d'alimentation en hydrogène

30. Le système d'alimentation en hydrogène transfère l'hydrogène depuis le système de stockage jusqu'au système d'entraînement à la pression et à la température appropriées au bon fonctionnement de la pile à combustible ou du moteur à combustion interne. À cette fin, ce système comporte une série de vannes de réglage du débit, de détendeurs, de filtres, de tuyauteries et d'échangeurs de chaleur. Sur les véhicules à système de stockage d'hydrogène liquéfié, l'hydrogène, qu'il soit sous forme liquide ou gazeuse, s'écoule hors du système de stockage, puis est chauffé à la température appropriée avant d'être acheminé vers le moteur à combustion interne ou le système de piles à combustible. Dans le cas des véhicules à système de stockage d'hydrogène comprimé, il peut aussi être nécessaire de soumettre l'hydrogène gazeux à un conditionnement thermique, particulièrement lorsque les températures sont très inférieures à zéro.

31. Le système d'alimentation en carburant doit détendre l'hydrogène de la pression du système de stockage à la pression appropriée pour alimenter le système de pile à combustible ou le moteur à combustion interne. Dans le cas d'un système de stockage d'hydrogène comprimé dont la PSN est de 70 MPa, par exemple, il peut être nécessaire de réduire la pression, qui peut atteindre 87,5 MPa, à moins de 1 MPa à l'entrée du système de pile à combustible, ou typiquement à moins de 1,5 MPa à l'entrée d'un système à moteur à combustion interne. Cette réduction de pression peut nécessiter plusieurs étages de détendeurs afin d'obtenir un réglage exact et stable et d'assurer une protection efficace des équipements aval contre les surpressions en cas de défaillance d'un détendeur. La protection du système d'alimentation contre les surpressions peut être réalisée en évacuant l'hydrogène gazeux au moyen de soupapes de surpression ou en coupant l'arrivée de l'hydrogène (par fermeture de la vanne d'arrêt du système de stockage d'hydrogène) en cas de détection d'une surpression aval.

5. Système de pile à combustible

32. Le système de pile à combustible produit l'électricité nécessaire pour faire fonctionner les moteurs d'entraînement et charger les batteries et les condensateurs du véhicule. Il existe divers types de piles à combustible. Les plus utilisés sur les automobiles sont les piles à membranes échangeuses de protons (PEMFC), car leur température de fonctionnement est plus basse, ce qui permet de raccourcir le délai de démarrage. Comme les autres piles à combustible, les PEMFC font réagir l'hydrogène avec l'oxygène (de l'air) par voie

électrochimique pour produire du courant électrique continu. Les piles à combustible permettent de produire de l'électricité en continu lorsqu'elles sont alimentées en hydrogène et en oxygène (de l'air), ainsi que de l'eau, sans émettre de dioxyde de carbone (CO₂) ou d'autres polluants typiques produits par les moteurs à combustion interne fonctionnant à l'essence.

33. Comme illustré à la figure 1, les systèmes typiques de pile à combustible sont équipés d'un ventilateur qui alimente les piles en air. Entre 50 et 70 % de l'oxygène envoyé dans les piles à combustible est consommé. Le reste est évacué. La majeure partie de l'hydrogène alimentant le système de pile à combustible est consommé dans les piles, mais un faible excédent d'hydrogène est nécessaire pour éviter que celles-ci ne se détériorent. Cet excédent est soit mélangé avec les gaz générés par la réaction électrochimique de manière à produire des effluents gazeux non inflammables, soit transformé par réaction catalytique.

34. Le système de pile à combustible comprend aussi des composants auxiliaires permettant d'évacuer la chaleur résiduelle. La plupart des systèmes de pile à combustible sont refroidis avec un mélange de glycol et d'eau. Des pompes font circuler le liquide de refroidissement entre les piles et le radiateur.

35. Les piles sont habituellement raccordées en série de manière à ce que la tension totale soit comprise entre 300 et 600 V (courant continu). Étant donné la tension élevée produite par les piles, toutes les tuyauteries de réactif et d'agent de refroidissement (y compris l'agent de refroidissement lui-même) reliées à la pile à combustible doivent être isolées électriquement du châssis du véhicule, qui est conducteur, afin d'éviter les courts-circuits pouvant endommager l'équipement ou les risques d'électrocution pour les personnes en cas de rupture du revêtement isolant.

6. Système d'entraînement électrique et de gestion de l'énergie

36. L'énergie électrique produite par le système de pile à combustible est utilisée pour alimenter les moteurs du système d'entraînement électrique. Comme illustré à la figure 2, de nombreux véhicules à pile à combustible sont du type à traction, le moteur électrique de traction et la transmission étant situés dans le « compartiment moteur » disposé transversalement au-dessus de l'essieu avant ; toutefois, d'autres configurations, y compris des systèmes à propulsion, sont aussi envisageables. Sur les véhicules à pile à combustible de grande taille, la configuration peut être à quatre roues motrices, avec des moteurs électriques sur l'essieu avant et sur l'essieu arrière, ou des moteurs compacts au niveau de chaque roue.

37. La « position de l'accélérateur » sert de référence au système de commande des moteurs d'entraînement pour déterminer la puissance à envoyer aux roues motrices. De nombreux véhicules à pile à combustible utilisent des batteries ou des ultracondensateurs comme source d'énergie complémentaire. Ces véhicules peuvent également être équipés d'un système de freinage par récupération, qui permet de recharger des batteries ou des ultracondensateurs et de maximiser ainsi le rendement énergétique.

38. Les moteurs d'entraînement peuvent être alimentés soit en courant continu, soit en courant alternatif. Dans le cas des moteurs à courant alternatif, le système de commande du moteur doit convertir le courant continu produit par les piles à combustible, batteries et ultracondensateurs en courant alternatif. Inversement, si le véhicule est doté d'un système de freinage par récupération, le système de commande du moteur doit convertir en courant continu le courant alternatif produit par le moteur afin que l'énergie récupérée puisse être stockée dans des batteries ou des ultracondensateurs.

7. Moteurs à combustion interne (MCI)

39. L'hydrogène peut également être utilisé pour alimenter des moteurs à combustion interne plutôt que des systèmes de pile à combustible. Bien qu'il soit nécessaire d'adapter les moteurs à combustion interne pour qu'ils fonctionnent à l'hydrogène, le principe reste le même et, par conséquent, la majeure partie de la transmission des véhicules à moteur à essence peut être utilisée. Le système de ravitaillement en hydrogène et le système de stockage d'hydrogène sont identiques à ceux des véhicules à pile à combustible à hydrogène.

Le système d'alimentation en hydrogène, quant à lui, doit être modifié de manière à être compatible avec le système d'injection d'un véhicule à moteur à combustion interne.

D. Argumentation concernant le domaine d'application, les définitions et l'applicabilité des prescriptions

1. Argumentation concernant la section 2 (Domaine d'application)

40. Le présent RTM ONU s'applique aux systèmes de stockage d'hydrogène dont la pression de service nominale (PSN) est inférieure ou égale à 70 MPa et dont la pression maximale de remplissage correspondante est égale à 125 % de la pression de service nominale. Les systèmes dont la PSN est égale ou inférieure à 70 MPa incluent tous les systèmes de stockage actuellement susceptibles de présenter un intérêt commercial pour les applications automobiles. À l'avenir, s'il apparaît souhaitable d'homologuer des systèmes ayant des pressions de service nominales supérieures, il conviendra de réexaminer les procédures d'essai d'homologation.

41. Le RTM ONU s'applique aux systèmes de stockage de carburant montés à demeure sur un véhicule pour une utilisation pendant toute la durée de service du véhicule. Il ne s'applique pas aux systèmes de stockage utilisés pour le ravitaillement par échange de réservoirs. Il ne s'applique pas non plus aux véhicules équipés de systèmes de stockage électrochimique ; il s'applique par contre aux véhicules à stockage par absorption ou adsorption d'hydrogène gazeux ou liquide.

42. L'infrastructure de ravitaillement en hydrogène établie avant 2010 est utilisable pour les véhicules dont la PSN est au maximum de 70 MPa. Le RTM ONU ne traite pas des prescriptions s'appliquant à la station de distribution ou à l'interface station de distribution/véhicule.

43. Le RTM ONU énonce des prescriptions concernant l'intégrité du système de stockage après un choc, mais il ne formule pas de prescriptions concernant les conditions de l'essai de choc. Il appartiendra aux Parties contractantes à l'Accord de 1998 d'exécuter des essais de choc dans les conditions prévues par leur réglementation nationale. Dans le cas des véhicules utilitaires lourds pour lesquels il n'existe pas d'essai de choc, plusieurs Parties contractantes estiment qu'il faudrait instituer un niveau minimal de sécurité en testant l'intégrité du système d'alimentation en carburant. À cet égard, les essais d'accélération des réservoirs de stockage de gaz et de leurs accessoires ont été bien établis dans plusieurs règlements, tels que le Règlement ONU n° 67 (Véhicules alimentés au gaz de pétrole liquéfié), le Règlement ONU n° 110 (Véhicules alimentés au gaz naturel comprimé et au gaz naturel liquéfié), ainsi que le Règlement (UE) n° 406/2010 sur le gaz naturel liquéfié portant application du Règlement (CE) n° 79/2009 relatif à la sécurité des véhicules fonctionnant à l'hydrogène. L'accélération à laquelle sont soumis le système de stockage et ses accessoires de fixation à la structure du véhicule au cours de l'essai varie en fonction de la catégorie du véhicule. L'essai pratique peut être remplacé par une méthode de calcul si son équivalence peut être démontrée.

44. Aucun consensus sur l'essai d'accélération n'a été dégagé pendant la phase 2 des travaux du groupe de travail informel sur le RTM ONU n° 13, les Parties contractantes n'étant pas d'accord sur l'objectif de l'essai ou sur la manière dont il répondait à une prescription de sécurité donnée. Il a toutefois été décidé d'approfondir l'étude de l'intégrité du système d'alimentation en carburant lors d'une future phase 3, qui permettrait de recueillir des données de terrain auprès des équipementiers et d'autres parties concernées. La phase 3 prendrait également en compte d'autres prescriptions en matière d'intégrité du système d'alimentation en carburant, telles qu'un essai de choc latéral.

45. Alors que la phase 1 de l'élaboration du RTM ONU n° 13 ciblait les voitures particulières (véhicules des catégories 1-1 et 1-2 dont le PTC est inférieur ou égal à 4 536 kg), la phase 2 vise à étendre le champ d'application aux véhicules utilitaires lourds (véhicules de la catégorie 1-2 dont le PTC est supérieur à 4 536 kg et véhicules de la catégorie 2). Cela reflète la demande croissante pour des technologies de carburants de substitution dans le cadre d'un déploiement commercial. L'utilisation de systèmes d'hydrogène gazeux comprimé dans les autobus commerciaux a déjà démontré la faisabilité, les avantages et la

sécurité des systèmes installés pour les véhicules de catégorie 1-2 dont le PTC est supérieur à 4 536 kg. L'inclusion des véhicules de catégorie 2 favorisera la collecte de données sur l'applicabilité à ces véhicules. L'élaboration des prescriptions et des procédures d'essai pour les véhicules utilitaires lourds devrait tenir compte des différentes configurations et des différents cas d'utilisation, de l'augmentation des masses et dimensions, des concepts de sécurité (par exemple, disponibilité des procédures d'essai de collision, limitations de vitesse et autres contraintes, etc.), de l'augmentation de la durée de service, etc.

2. Argumentation concernant les paragraphes 3.9 et 3.48 (Définitions de la durée de service et date de retrait du service)

46. Ces définitions s'appliquent à la qualification du système de stockage d'hydrogène comprimé pour une utilisation sur route. La durée de service est la période maximale pour laquelle les équipements sont qualifiés ou autorisés pour le service. Le présent document énonce des critères de qualification pour les systèmes de stockage d'hydrogène liquéfié ou comprimé pour une durée de service inférieure ou égale à 25 ans (par. 5.1). La durée de service est spécifiée par le fabricant.

47. La date de retrait du service est la date du calendrier (mois et année) spécifiée pour le retrait du service. La date de retrait du service peut être fixée par une autorité de tutelle. En principe, elle correspond à la date de mise en service indiquée par le constructeur plus la durée de service.

3. Argumentation concernant la section 4 (Applicabilité des prescriptions)

48. Les prescriptions fonctionnelles énoncées au paragraphe 5 s'appliquent à la qualification de la conception pour une utilisation sur route. En principe, toutes les Parties contractantes doivent reconnaître les véhicules qui satisfont pleinement aux prescriptions du présent RTM ONU comme propres à la circulation routière dans le cadre de leurs juridictions. Les Parties contractantes disposant de systèmes d'homologation de type peuvent exiger en outre que les véhicules satisfassent à leurs prescriptions concernant la conformité de production, la qualification des matériaux et la résistance à la fragilisation par l'hydrogène.

49. Il est aussi admis que toute Partie contractante pourra également, si elle le désire, établir des prescriptions différentes pour certains véhicules aux fins de leur qualification pour l'utilisation sur route dans le cadre de sa juridiction. Ainsi, les véhicules qualifiés pour une utilisation sur route sur la base des prescriptions du présent RTM ONU, notamment l'exécution de 11 000 cycles de pression au titre des essais hydrauliques du paragraphe 5.1.2, seraient reconnus propres à l'utilisation sur route dans toutes les Parties contractantes. Une Partie contractante pourrait de son côté décider de qualifier des voitures particulières et des utilitaires légers pour utilisation dans sa juridiction sur la base de 7 500 cycles de pression pour le stockage de l'hydrogène comprimé (par. 5.1.1.2).

E. Argumentation concernant la section 5 (Prescriptions fonctionnelles)

1. Prescriptions d'essai et considérations de sécurité s'appliquant au système de stockage d'hydrogène comprimé

50. Le confinement de l'hydrogène à l'intérieur du système de stockage d'hydrogène comprimé est indispensable pour exclure toute fuite d'hydrogène vers le milieu environnant et les systèmes situés en aval. Le système de stockage est défini comme incluant toutes les surfaces qui forment l'enceinte assurant le confinement primaire de l'hydrogène à haute pression. Cette définition permet de tenir compte des progrès futurs en matière de conception, de matériaux et de construction, qui devraient permettre de réduire le poids et d'accroître le volume et la modularité des réservoirs, et d'améliorer d'autres caractéristiques.

51. Les prescriptions relatives au système de stockage d'hydrogène comprimé et à ses dispositifs de fermeture primaire sont définies au paragraphe 5.1. La disposition de l'alinéa b) du paragraphe 5.1 permet aux Parties contractantes d'exiger que les dispositifs de fermeture primaire soient montés directement sur le réservoir. Si nécessaire, les constructeurs peuvent choisir d'installer des TPRD supplémentaires à d'autres endroits du réservoir. Cependant,

tout TPRD supplémentaire doit être raccordé directement au réservoir par une conduite d'alimentation dont l'intégrité mécanique et la durabilité ont été démontrées dans le cadre des essais de qualification des systèmes de stockage d'hydrogène comprimé (par. 5.1.1 et 5.1.2).

52. *Prescriptions en matière d'essais fonctionnels* : les prescriptions en matière d'essais fonctionnels pour tous les systèmes de stockage d'hydrogène comprimé destinés aux véhicules routiers sont énoncées au paragraphe 5.1. Ces prescriptions prennent en compte les facteurs de contrainte et les conditions d'utilisation sur route avérés afin de garantir la fiabilité de la qualification des véhicules. Les essais de qualification visent à démontrer l'aptitude du système à assurer toutes les fonctions essentielles pendant toute la durée de service, y compris pendant les opérations de ravitaillement et de vidage du réservoir, et en cas de stationnement en conditions extrêmes et d'incendie, sans que le confinement sécurisé de l'hydrogène dans le système de stockage soit compromis. Ces critères s'appliquent à la qualification des systèmes de stockage destinés à équiper des véhicules neufs.

53. *Conformité de production pour les systèmes de stockage soumis aux essais officiels de qualification de la conception* : les fabricants doivent veiller à ce que toutes les unités produites satisfassent aux prescriptions en matière d'essais fonctionnels de vérification du paragraphe 5.1.2. En outre, les fabricants sont tenus de surveiller la fiabilité, la durabilité et la résistance résiduelle d'unités produites représentatives pendant toute la durée de service.

54. *Ordre de présentation des prescriptions* : les prescriptions en matière de qualification de conception des systèmes de stockage d'hydrogène comprimé énoncées au paragraphe 5.1 comprennent les éléments suivants :

- 5.1.1 Essais de vérification des caractéristiques de référence ;
- 5.1.2 Essai de vérification de la durabilité (essais hydrauliques séquentiels) ;
- 5.1.3 Essais de vérification des caractéristiques attendues en utilisation sur route (essais pneumatiques séquentiels) ;
- 5.1.4 Essai de vérification du comportement au feu : feu localisé/enveloppant (conditions justifiant le retrait du service).

55. Le paragraphe 5.1.1 définit les caractéristiques utilisées dans les autres essais fonctionnels de vérification et aux fins du contrôle de la qualité de la production. Les paragraphes 5.1.2 et 5.1.3 traitent des essais de qualification qui ont pour objet de vérifier que le système peut assurer les fonctions de base, à savoir le ravitaillement, le vidage de réservoir et le stationnement en conditions extrêmes d'utilisation sur route sans fuite ou éclatement pendant toute la durée de service prescrite. Le paragraphe 5.1.4 décrit l'essai permettant de vérifier que le système se comporte de manière sûre en cas d'incendie (conditions justifiant le retrait du service).

56. *Niveaux d'exigence comparables* : la question de la différence de niveau d'exigence entre le RTM ONU et les réglementations nationales relatives à l'utilisation sur route a été traitée, en ce qui concerne les règlements de l'Union européenne, dans une évaluation comparative parrainée par l'UE (C. Visvikis, Hydrogen-powered vehicles: A Comparison of the European legislation and the draft ECE global technical regulation, Transport Research Laboratory, CPR1187, 2011). Le rapport conclut : « Dans l'ensemble, les travaux ont montré qu'il existait des différences fondamentales entre la législation européenne et le projet de règlement technique mondial, mais on manque de données expérimentales ou réelles pour déterminer avec certitude quelle réglementation est la plus stricte. Certains aspects du système de stockage d'hydrogène et de son installation sont réglementés dans le cadre européen alors qu'ils ne sont pas pris en compte dans le projet de règlement technique mondial. Toutefois, les prescriptions fonctionnelles incluses dans le règlement mondial semblent, en définitive, être plus strictes que celles de la législation européenne ». Le rapport ajoute : « ... l'omission de l'essai de pénétration est une lacune potentiellement importante du projet de règlement technique mondial. Sans doute, les réservoirs d'hydrogène ont peu de chances d'être exposés à des tirs d'arme à feu au cours de leur utilisation, mais on ne doit pas perdre de vue les risques en matière de sûreté [posés par] le vandalisme ou le terrorisme. ».

57. L'examen des fondements techniques des prescriptions des diverses Parties contractantes en matière de sécurité routière et le constat ultérieur que l'objectif de sécurité visé était atteint grâce aux prescriptions du RTM ONU ont permis de garantir que le niveau d'exigence du RTM ONU était comparable à celui des règlements nationaux relatifs à l'utilisation sur route en vigueur. Deux exemples peuvent être cités :

- a) Premier exemple : certains règlements nationaux prescrivent que le système de stockage d'hydrogène comprimé soit soumis à 45 000 cycles de pression hydraulique de remplissage complet sans subir d'éclatement à moins qu'une fuite ne survienne auparavant ;
- b) Deuxième exemple : une prescription prioritaire fixant la pression d'éclatement initiale minimale à 225 % de la PSN pour les réservoirs composites en fibre de carbone et à 350 % de la PSN pour les réservoirs composites en fibre de verre a été appliquée précédemment pour les réservoirs de GNC basse pression. On a examiné les fondements d'une telle prescription concernant les réservoirs neufs (non utilisés). Il a été impossible de trouver une justification fiable, basée sur des données quantitatives, des prescriptions antérieures relatives à l'utilisation sur route. En revanche, la capacité des systèmes à fonctionner et à résister aux conditions auxquelles ils sont soumis pendant toute la durée de service avait été démontrée à l'aide de méthodes modernes visant à déterminer, sur la base de décennies d'utilisation en situation réelle, ce que sont des conditions de service difficiles et à mettre au point des essais de qualification destinés à reproduire et combiner les conditions extrêmes correspondantes. Cependant, il a été établi qu'un facteur de risque pour lequel un essai d'éclatement était jugé pertinent, à savoir la capacité du réservoir à résister à l'éclatement sous l'effet des surpressions survenant pendant le remplissage tout au long de la durée de service, n'avait pas encore été pris en compte dans d'autres prescriptions d'essai. Les conditions d'essai les plus strictes s'appliquent aux réservoirs « en fin de vie » (état simulé par des conditions d'essai extrêmes) et non pas aux réservoirs neufs. En conséquence, une prescription de résistance résiduelle (« en fin de vie ») selon laquelle le réservoir doit supporter sans éclater 180 % de la PSN pendant 4 min a été adoptée, l'équivalence de la probabilité de défaillance dans ces conditions et lors de l'application d'une pression égale à 150 % de la PSN pendant 10 h ayant été démontrée (sur la base des données sur la durée de fonctionnement avant défaillance pour les composites en fibre de verre dans le « cas le plus défavorable »). On considère que la surpression maximale pendant le ravitaillement est égale à 150 % de la PSN. Des expériences menées sur des réservoirs fortement isolés ont par ailleurs montré que le refroidissement après un réchauffement par compression prenait environ 10 h. Une prescription additionnelle fixant la pression d'éclatement minimale des réservoirs neufs (non utilisés) à 200 % de la PSN a été examinée comme moyen de présélectionner les réservoirs neufs susceptibles de résister aux essais séquentiels de durabilité sous une pression supérieure à 180 % de la PSN, en tenant compte d'une variabilité maximale de 10 % de la résistance initiale des réservoirs. La valeur minimale de 225 % de la PSN a été adoptée dans le présent document en tant que valeur indicative prudente ; ce choix ne repose pas sur des données quantitatives, mais sur les pratiques antérieures de certaines Parties contractantes, étant entendu que l'on disposera à l'avenir d'éléments, de données et d'analyses supplémentaires validant cette valeur ou justifiant son réexamen.

58. La valeur minimale indicative de 225 % de la PSN a été adoptée à titre provisoire pour les réservoirs composites en fibre de carbone en raison de l'absence de données quantitatives dans la phase 1 du RTM ONU n° 13. Au cours des discussions ultérieures de la phase 2, la capacité des réservoirs en fin de vie à résister à l'éclatement à une pression égale à 180 % de la PSN a été vérifiée sur la base des données relatives aux réservoirs composites en fibre de carbone de PSN égale à 70 MPa, fournies par le Japon, en supposant que la pression d'éclatement initiale se situe dans la plage $BP_O \pm 10\%$ (BP_O étant la valeur médiane de la

pression d'éclatement initiale). En conséquence, il a été validé que la pression d'éclatement initiale des réservoirs composites en fibre de carbone doit être égale à 200 % de la PSN.

59. Le nombre minimal de cycles de pression prescrit au paragraphe 5.1.1.2 (résistance aux cycles de pression) est de 22 000. Les 22 000 cycles de remplissage complet correspondent à bien plus de 7 millions de véhicules-kilomètres parcourus au cours de la durée de vie (sur la base de 350 à 500 km parcourus par remplissage complet). Étant donné que la durée de service prévue est très inférieure à 1 million de kilomètres, il a été considéré que la valeur prescrite de 22 000 cycles de pression offrait une marge substantielle par rapport au kilométrage parcouru par le véhicule dans le cas le plus défavorable. De plus, il existe dans les normes nationales diverses prescriptions garantissant que le système de stockage est capable de supporter l'application d'une pression statique (stationnement) et cyclique (ravitaillement) en gardant une résistance résiduelle. L'aptitude à résister à ces deux types d'expositions a en général été évaluée sur la base d'essais équivalents à ceux des paragraphes 5.1.2.4, 5.1.2.5 et 5.1.2.6, chaque essai étant cependant effectué sur un réservoir neuf. Une prescription supplémentaire prioritaire fixant la pression d'éclatement initiale minimale (à savoir 225 % de la PSN pour les réservoirs composites en fibre de carbone et 350 % de la PSN pour les réservoirs composites en fibre de verre) a été couramment appliquée pour prendre en compte de manière indirecte les facteurs non reproduits, tels que la combinaison de contraintes appliquées individuellement et d'effets chimiques ou physiques, ainsi que la capacité à résister aux surpressions survenant lors du remplissage. Les prescriptions du RTM ONU, toutefois, permettent de prendre en compte directement ces facteurs en reproduisant de manière réaliste les effets combinés des contraintes, des effets chimiques et physiques et des surpressions. Contrairement à ce qui est prévu pour d'autres carburants gazeux, les prescriptions concernant le ravitaillement en hydrogène prévoient des mesures de sécurité pour limiter les surpressions potentielles aux cas extrêmes reproduits lors des essais du réservoir. En outre, les prescriptions du RTM ONU garantissent que la résistance résiduelle du réservoir lui permet de supporter en fin de vie des surpressions extrêmes, à savoir des pressions proches (à 20 % près) de celle pouvant être supportée par un réservoir neuf. Toutes les prescriptions du RTM ONU sont explicitement fondées sur des données publiées qui établissent une relation claire et quantitative entre les critères d'essai et certains aspects de la sécurité en utilisation sur route. Par conséquent, les critères apportant une preuve indirecte de la sécurité d'utilisation pendant toute la durée de service et en fin de vie ont été remplacés par des critères permettant de vérifier directement la capacité à fonctionner en toute sécurité en fin de vie dans des conditions d'expositions combinées correspondant au cas le plus défavorable, ce qui renforce le niveau d'exigence en matière de sécurité sur toute la durée de service. Parmi les exemples de renforcement du niveau d'exigence, on peut citer les prescriptions du RTM ONU prévoyant des essais de cycles de pression effectués avec de l'hydrogène gazeux à des températures extrêmes (par. 5.1.3.2) plutôt qu'uniquement à température ambiante, des essais de perméation effectués avec de l'hydrogène gazeux à des températures extrêmes, des essais en conditions simulées de fin de vie (par. 5.1.3.3), des essais de résistance résiduelle en fin de vie (par. 5.1.2.7) après exposition aux effets combinés de plusieurs facteurs de contrainte (par. 5.1.2) et des essais d'exposition à un feu localisé et à un feu enveloppant (par. 5.1.4).

60. Les sections suivantes (par. 5.1.1 à 5.1.4) présentent l'argumentation relative aux prescriptions fonctionnelles énoncées au paragraphe 5.1 en ce qui concerne l'intégrité du système de stockage d'hydrogène comprimé.

a) Argumentation concernant le paragraphe 5.1.1 : Essais de vérification des caractéristiques de référence

61. Les essais de vérification des caractéristiques de référence répondent à plusieurs fonctions : i) vérifier que les systèmes soumis en vue de la qualification de la conception (le lot de qualification) présentent des caractéristiques homogènes et correspondent aux dossiers du fabricant en matière de contrôle qualité de la production ; ii) établir la valeur médiane de la pression d'éclatement initiale, qui est utilisée pour les essais fonctionnels de vérification (par. 5.1.2 et 5.1.3) et qui peut être utilisée pour le contrôle qualité de la production (c'est-à-dire afin de contrôler la conformité de la production avec les caractéristiques du lot de qualification) ; et iii) vérifier que les prescriptions relatives à la

pression d'éclatement minimale et au nombre de cycles de pression avant perte d'étanchéité sont respectées.

62. Les prescriptions concernant la pression d'éclatement initiale de référence diffèrent des prescriptions concernant l'essai d'éclatement « en fin de vie » qui conclut les essais séquentiels des paragraphes 5.1.2 et 5.1.3. La pression d'éclatement initiale s'applique à un réservoir neuf non utilisé tandis que la pression d'éclatement « en fin de vie » concerne un réservoir qui a subi une série d'essais fonctionnels (par. 5.1.2 ou 5.1.3) simulant les conditions d'utilisation et les conditions environnementales les plus défavorables sur la totalité de la durée de vie. La fatigue résultant des conditions d'utilisation et des conditions environnementales s'accumulant au fil du temps, on peut s'attendre à ce que la pression d'éclatement « en fin de vie » (c'est-à-dire la résistance à l'éclatement) soit inférieure à celle d'un réservoir neuf.

i) *Argumentation concernant le paragraphe 5.1.1.1 : Pression d'éclatement initiale de référence*

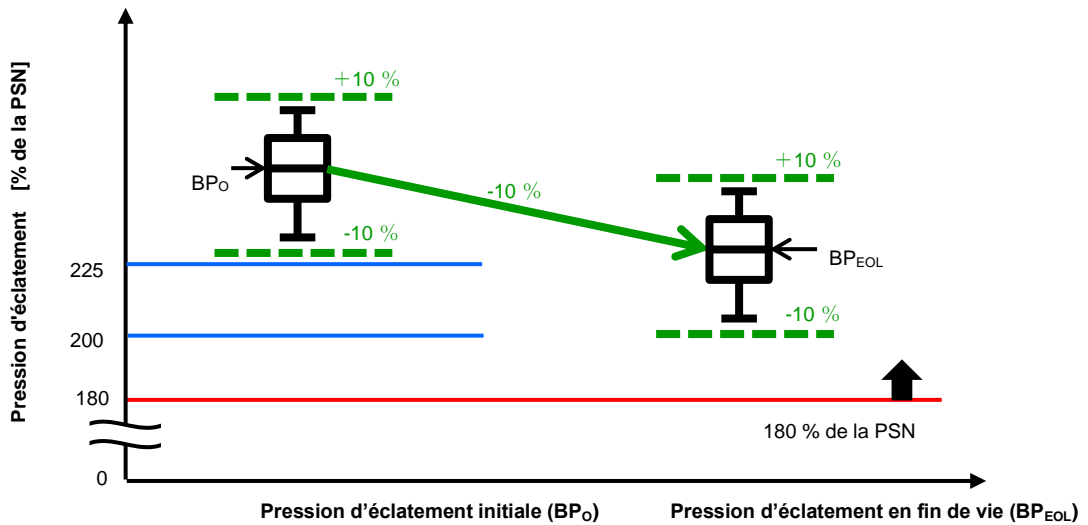
63. Le paragraphe 5.1.1.1 prescrit de déterminer la valeur médiane de la pression d'éclatement initiale BP_0 et de vérifier que les pressions d'éclatement initiales des systèmes dans le lot de qualification se situent dans la plage $BP_0 \pm 10\%$. La BP_0 est utilisée comme valeur de référence pour vérifier les caractéristiques (par. 5.1.2.8 et 5.1.3.5) et la conformité avec le lot de qualification. Le paragraphe 5.1.1.1 prévoit de vérifier que la BP_0 est supérieure ou égale à 225 % de la PSN ou à 350 % de celle-ci pour les composites en fibre de verre. Ces valeurs, qui ne reposent pas sur des données, mais sur des pratiques antérieures, ont été retenues à titre indicatif et provisoire en attendant que de nouvelles données ou analyses permettent un réexamen de cette question au cours de la phase 2 de l'élaboration du présent RTM ONU. Ainsi, une prescription fixant une valeur de pression d'éclatement initiale minimale de 200 % peut s'appuyer sur une justification fondée sur des données selon laquelle une prescription fixant une pression d'éclatement en fin de vie supérieure à 180 % de la PSN (basée sur la capacité à résister aux surpressions maximales survenant au cours du ravitaillement), associée à une baisse maximale admissible de 20 %, sur la totalité de la durée de vie, de la résistance à l'éclatement, équivaut à une prescription fixant la valeur médiane de la pression d'éclatement initiale à 225 % de la PSN, ce qui correspond à une pression d'éclatement minimale égale à 200 % de la PSN une fois prise en compte une variabilité maximale admissible de 10 % de la résistance initiale. L'intervalle entre la phase 1 et la phase 2 donnera la possibilité de recueillir de nouvelles données ou de mener de nouvelles analyses concernant la valeur minimale de 225 % de la PSN (ou une autre valeur), ce qui permettra de prendre une décision lors de la phase 2.

64. Le paragraphe 5.1.1.1 précise que la pression d'éclatement initiale minimale de 225 % de la PSN pour les réservoirs composites en fibre de carbone (350 % pour les réservoirs composites en fibre de verre) a été retenue comme valeur indicative reposant sur des pratiques antérieures au cours de la phase 1 du RTM ONU n° 13.

65. Au cours des discussions ultérieures de la phase 2, le Japon a présenté des données expérimentales sur des réservoirs composites en fibre de carbone de PSN égale à 70 MPa, afin d'étayer le passage de la valeur de la pression d'éclatement initiale minimale de 225 % à 200 % de la PSN pour ce type de réservoirs (Tomioka, J. et al., Influences of Hydraulic Sequential Tests on the Burst Strength of Type-4 Compressed Hydrogen Containers, Technical Paper ID 159, 2019 International Conference on Hydrogen Safety, septembre 2019).

Note : la prescription relative aux réservoirs en fibre de verre reste inchangée, à 350 % de la PSN.

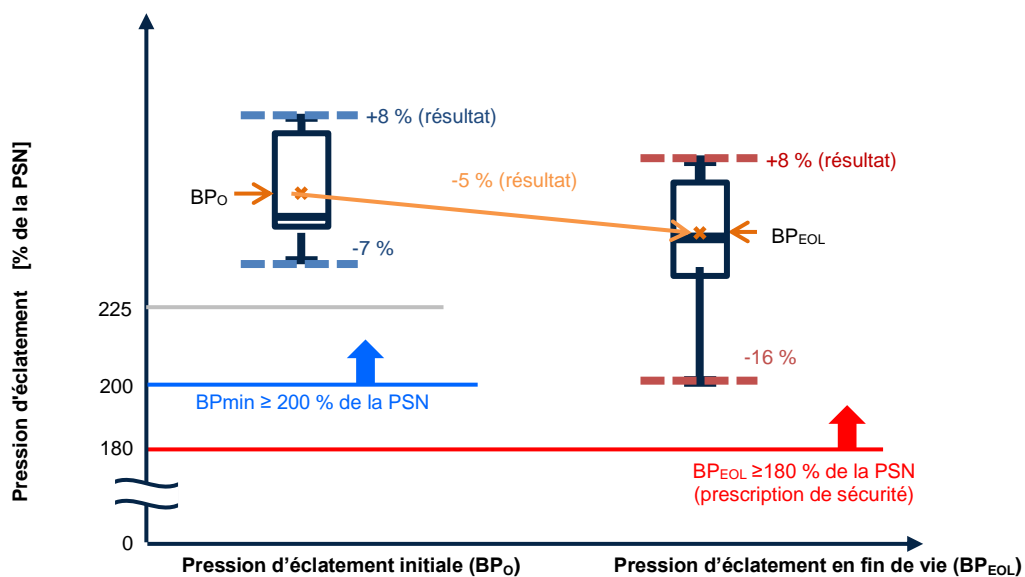
Figure 6
Relation entre pression d'éclatement initiale et pression d'éclatement en fin de vie (valeurs théoriques)



66. La relation théorique entre la pression d'éclatement initiale et la pression d'éclatement en fin de vie est illustrée à la figure 6. Les épreuves de pression hydraulique séquentielles menées par le Japon ont montré que les réservoirs dont la pression d'éclatement était située dans la plage $BP_0 \pm 10\%$ pouvaient résister en fin de vie à une pression supérieure ou égale à 180 % de la PSN, même si la pression d'éclatement initiale minimale était réduite à 200 % de la PSN.

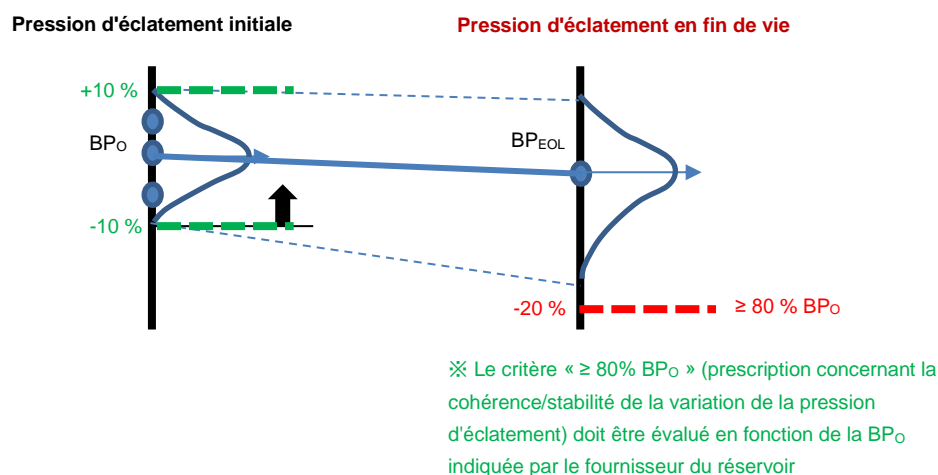
67. Méthode de vérification par les épreuves de pression hydraulique séquentielles : la variabilité de la pression d'éclatement initiale et de la pression d'éclatement en fin de vie ainsi que le taux moyen de diminution de la pression d'éclatement liée à la dégradation au fil du temps ont été étudiées à l'aide de données provenant d'essais menés sur des réservoirs en fibre de carbone ($N \geq 10$). Les réservoirs provenaient d'un lot unique dont la résistance à l'éclatement était connue (pression d'éclatement initiale supérieure à 225 % de la pression PSN).

Figure 7
Résultats de l'essai de vérification



※ Le critère « $\geq 80\% BP_0$ » (prescription concernant la cohérence/stabilité de la variabilité de la pression d'éclatement) doit être évalué en fonction de la BP_0 indiquée par le fournisseur du réservoir

Figure 8
Distribution statistique des valeurs de BP_0 et BP_{EOL}



68. Les résultats des essais sont présentés à la figure 7. La valeur minimale de la pression d'éclatement initiale était supérieure à 225 % de la PSN et se situait dans la plage $BP_0 \pm 10 \%$. La pression d'éclatement en fin de vie, qui rend compte de la variabilité et de la dégradation due aux essais, était supérieure à 180 % de la PSN. Elle était également supérieure à 80 % de la BP_0 , avec une marge suffisante (fig. 8).

69. Les résultats montrent qu'il est possible de réduire de 225 % à 200 % de la PSN la valeur de la pression d'éclatement initiale minimale tout en maintenant la pression d'éclatement en fin de vie (BP_{EOL}) à une valeur supérieure aux prescriptions, à savoir 180 % de la PSN et 80 % de la BP_0 .

70. Cette conclusion est valable pour tous les réservoirs dont la BP_{min} est fonction de la PSN de conception. Rien ne prouve à l'heure actuelle que la variabilité dépende de la PSN. Cependant, au cours des discussions de la phase 2, une autre Partie contractante a déclaré qu'on manquait de données pour modifier la pression d'éclatement initiale requise pour les réservoirs de PSN égale à 35 MPa. Par conséquent, les Parties contractantes qui le souhaitent peuvent maintenir la valeur requise pour ces réservoirs à 225 % de la PSN, étant entendu que l'on disposera à l'avenir de données et d'analyses supplémentaires. Si une pression d'éclatement initiale minimale de 200 % de la PSN pour les réservoirs en fibre de carbone est considérée comme suffisante en tant que prescription fonctionnelle aux fins du RTM ONU n° 13, les données de vérification sont basées sur les essais réalisés avec des réservoirs provenant d'un lot unique. La qualité de la production liée à la variabilité des différents lots, etc. est considérée comme relevant de la responsabilité des fabricants de réservoirs.

71. Outre que cette prescription permet de vérifier les caractéristiques fonctionnelles du réservoir, on peut considérer que le fait qu'elle soit remplie donnera l'assurance au laboratoire d'essais que le réservoir présente une résistance suffisante avant l'exécution des essais de qualification prescrits aux paragraphes 5.1.2, 5.1.3 et 5.1.4.

ii) *Argumentation concernant le paragraphe 5.1.1.2 : Résistance aux cycles de pression (nombre minimal de cycles)*

72. D'après cette prescription, trois (3) réservoirs neufs prélevés au hasard doivent être soumis à des cycles de pression hydraulique à 125 % de la PSN sans éclater pendant 22 000 cycles ou jusqu'à l'apparition d'une fuite. La perte d'étanchéité ne doit pas survenir avant 7 500 ou 11 000 cycles pour les voitures particulières et utilitaires légers, au choix des Parties contractantes, et 11 000 cycles pour les véhicules utilitaires lourds. Pour une durée de vie comprise entre 15 ans et 25 ans, le nombre de cycles de pression sans fuite est égal à 11 000. L'argumentation en ce qui concerne les valeurs numériques appliquées dans cette prescription est exposée ci-après.

a. *Argumentation concernant le critère « fuite avant éclatement » de la prescription concernant la résistance aux cycles de pression (nombre minimal de cycles)*

73. La prescription concernant la résistance aux cycles de pression vise à permettre un contrôle initial de la résistance à l'éclatement sous l'effet des cycles de pression au cours de l'utilisation sur route. L'essai doit démontrer soit : i) la survenue d'une fuite (qui entraîne l'arrêt du véhicule et nécessite ultérieurement la réparation du réservoir ou son retrait du service (par. 5.2.1.4.3)) avant éclatement ; soit ii) la capacité du réservoir à supporter 22 000 cycles de pression hydraulique (remplissage complet) sans éclatement ou fuite.

74. Quel que soit le type de défaillance du réservoir, cette prescription garantit un niveau de protection suffisant pour permettre une utilisation sûre du réservoir pendant toute la durée de vie du véhicule. La distance minimale parcourue avant perte d'étanchéité du réservoir dépend d'un certain nombre de facteurs, y compris le nombre de cycles d'essai choisi par la Partie contractante et le kilométrage parcouru par le véhicule entre deux ravitaillements. Quel que soit le cas, le fait de fixer à 7 500 le nombre minimal de cycles avant perte d'étanchéité, sur la base de 320 km (200 miles) par remplissage, permettrait de parcourir plus de 1,6 million de km (1 million de miles) avant défaillance du réservoir. Le cas le plus défavorable serait la défaillance par éclatement, auquel cas le réservoir devrait pouvoir supporter 22 000 cycles. Pour des véhicules ayant une autonomie nominale sur route de 480 km (300 miles) par plein, 22 000 cycles de remplissage complet correspondent à plus de 10 millions de kilomètres (6 millions de miles), soit une distance largement supérieure au kilométrage qu'un véhicule pourrait raisonnablement parcourir pendant toute sa durée de vie (voir l'argumentation au paragraphe 5.1.1.2.2 ci-après). Deux cas sont donc à envisager : soit le réservoir est capable de résister (sans fuite ou éclatement) à l'exposition aux cycles de pression en utilisation sur route, soit il y a fuite avant éclatement, ce qui empêche toute utilisation ultérieure pouvant aboutir à l'éclatement.

75. La démonstration de la résistance à l'éclatement (sans fuite préalable) requiert un plus grand nombre de cycles de pression, à savoir 22 000, que la démonstration de la résistance à la perte d'étanchéité (à savoir entre 7 500 et 11 000). En effet, les conséquences d'un éclatement sont plus graves que celles d'une fuite, ce qui permet d'affirmer que la probabilité d'éclatement par cycle de pression est inférieure à la probabilité de fuite, conformément à la formule suivante : $\text{Risque} = (\text{probabilité de l'événement}) \times (\text{gravité de l'événement})$.

(Note : Le fait d'exécuter les cycles de pression hydraulique à une pression supérieure à 125 % de la PSN pourrait contribuer à provoquer la défaillance en un laps de temps plus court, mais il pourrait aussi faire apparaître des types de défaillance ne pouvant pas survenir en utilisation réelle.)

b. *Argumentation concernant le nombre de cycles ; nombre de cycles de pression hydraulique lors des essais de qualification : nombre de cycles supérieur ou égal à 7 500 et inférieur ou égal à 11 000*

76. Il incombe à chaque Partie contractante de fixer le nombre de cycles de pression hydraulique, principalement en raison des écarts entre les valeurs correspondant au cas le plus défavorable qui ont été retenues dans les différentes juridictions pour le kilométrage total parcouru pendant la durée de service attendue du véhicule et la fréquence de remplissage. Les écarts concernant le nombre maximal prévu de remplissages sont avant tout liés aux utilisations commerciales intensives des véhicules, comme dans le cas des taxis, qui peuvent être soumises à des contraintes d'exploitation très différentes selon les juridictions. On pourra comparer par exemple les données suivantes :

- a) Kilométrage au compteur du parc de véhicules (y compris les taxis) : le rapport Sierra Research n° SR2004-09-04 établi pour le California Air Resource Board (2004) a montré que le kilométrage total parcouru au cours de la durée de vie des véhicules mis à la casse en Californie était inférieur à 560 000 km (350 000 miles). Sur la base de ces chiffres et d'un kilométrage par plein variant entre 320 et 480 km (200 à 300 miles), on estime que le nombre maximal de remplissages complets au cours de la durée de service est compris entre 1 200 et 1 800 ;

- b) Kilométrage au compteur du parc de véhicules (y compris les taxis) : le rapport de Transport Canada sur les contrôles obligatoires des émissions en Colombie britannique (Canada) a montré qu'en 2009, le kilométrage au compteur des 5 véhicules les plus intensivement utilisés était compris entre 800 000 et 1 000 000 de km (500 000 et 600 000 miles). Compte tenu de l'année modèle déclarée pour chacun de ces véhicules, cela correspond à moins de 300 pleins par an, soit moins d'un plein par jour. Sur la base de ces chiffres et d'un kilométrage par plein variant entre 320 et 480 km (200 à 300 miles), on estime que le nombre maximal de pleins est compris entre 1 650 et 3 100 ;
- c) Utilisation comme taxis (postes de travail/jour et jours/semaine) : selon les données du New York City Taxicab Fact Book (Schaller Consulting, 2006), les utilisations les plus intensives correspondent à 320 km (200 miles) par poste et à une durée de service maximale de 5 ans. Moins de 10 % des véhicules restent en service pendant 5 ans. Le kilométrage moyen annuel est de 72 000 pour les véhicules exploités à raison de 2 postes par jour, 7 jours par semaine. Rien ne prouve qu'un véhicule quelconque ait été utilisé de manière intensive pendant toute sa durée de service, à savoir 5 ans. Toutefois, dans le cas d'un véhicule ravitaillé au maximum 1,5 à 2 fois par jour qui serait resté en service pendant 5 ans (durée de service maximale des taxis de la ville de New York), le nombre maximal de pleins au cours de cette période serait compris entre 2 750 et 3 600 ;
- d) Utilisation comme taxis (postes/jour et jours/semaine) : selon une enquête de Transport Canada portant sur les taxis de Toronto et Ottawa, l'utilisation intensive classique correspondait à 20 h par jour, 7 jours par semaine, et à des kilométrages journaliers parcourus allant de 540 à 720 km (335 à 450 miles). Les kilométrages totaux enregistrés au compteur n'étaient pas indiqués. Dans le cas le plus défavorable, à savoir une utilisation intensive constante pendant 7 ans (durée de service maximale déclarée pour un taxi), le kilométrage total maximal parcouru serait compris entre 1,4 et 1,9 million de km (entre 870 000 miles et 1,2 million de miles). Sur la base de 320 à 480 km (200 à 300 miles) parcourus par plein, le nombre de remplissages complets au cours d'une durée d'utilisation de 15 ans pourrait être compris entre 2 900 et 6 000. Compte tenu de ces hypothèses d'utilisation intensive, le nombre minimal de cycles de pression hydraulique (remplissage complet) requis pour la qualification des systèmes de stockage de l'hydrogène est fixé à 5 500 pour la phase 1 du RTM ONU n° 13. Le nombre maximal de cycles de pression (remplissage complet) est fixé à 11 000, ce qui correspond à un véhicule soumis à une utilisation intensive, ravitaillé à raison de deux pleins par jour pendant une durée de service totale de 15 ans (soit un kilométrage total parcouru de 3,5 à 5,3 millions de kilomètres (2,2 à 3,3 millions de miles)).

77. Le nombre de cycles a été fixé en tenant compte du fait que certains types de systèmes de stockage (tels que les réservoirs à coque en matériau composite enroulé autour de l'enveloppe interne) risquaient de ne pas être qualifiés pour une utilisation à une PSN de 70 MPa si le nombre de cycles était supérieur à 5 500. En conséquence, il a été admis que si le nombre de cycles prescrit était fixé à une valeur supérieure à 11 000, certaines Parties contractantes seraient amenées à prévoir des restrictions d'utilisation pour garantir que le nombre réel de remplissages ne dépasse pas le nombre de cycles prescrit.

78. Au cours de la phase 2, des données provenant de diverses régions (Japon, Allemagne, États-Unis) ont permis d'étayer la proposition consistant à conserver le nombre de cycles de pression hydraulique, fixé à 11 000, ainsi que le nombre de cycles avant éclatement, fixé à 22 000, lorsque la durée de vie des voitures particulières et utilitaires légers et des véhicules utilitaires lourds est portée à 25 ans.

- a) Japon – Une base de données de comptes-rendus des contrôles réglementaires menés sur les véhicules immatriculés au Japon en date de juillet 2019 a été analysée. Cette base de données contenait 6 000 comptes-rendus concernant des voitures particulières et utilitaires légers et 21 000 comptes-rendus concernant des véhicules utilitaires lourds (tous types de carburant confondus).

Aux fins du RTM ONU n° 13, l'analyse s'est concentrée sur les données relatives aux véhicules utilitaires, car ce sont ceux qui sont soumis à l'utilisation la plus intensive (conformément à la logique de la phase 1). On a calculé le kilométrage maximum parcouru par chaque véhicule pendant sa durée de vie en tenant compte d'une autonomie par plein de 320 km pour les utilitaires légers et de 400 km pour les utilitaires lourds. Le nombre de cycles de pression a été calculé sur la base des données ci-dessus et est indiqué dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1
Résultats de l'étude japonaise

Type de véhicule	Durée de service maximale	Kilométrage maximal	Nombre de remplissages pendant toute la durée de vie (« cycles d'essai sous pression »)	Réf : RTM ONU n° 13, phase 2 (proposition)
Utilitaire lourd	15 ans	--	--	11 000
	20 ans	3 500 000 km	8 450	11 000
	25 ans	4 000 000 km	9 750	11 000
Utilitaire léger	15 ans	--	--	7 500 ou 11 000
	20 ans	2 100 000 km	6 560	11 000
	25 ans	2 400 000 km	7 440	11 000

L'analyse détaillée figure dans le document intitulé « 210927 Estimation of VMT TF1-JAMA » publié sous la cote UN GTR13-11-12b (<https://wiki.unece.org/display/trans/GTR13-2-11th+session>). La méthodologie peut être résumée comme suit :

- i) Les comptes-rendus des contrôles réglementaires périodiques d'environ 400 000 véhicules routiers ont été collectés. Conformément à la classification japonaise, on entend par « véhicules utilitaires lourds » les véhicules de plus de 10 places assises et d'une capacité de charge supérieure à 1 250 kg (en supposant que le poids du véhicule est supérieur à 3 500 kg) ;
- ii) La distance annuelle parcourue par chaque véhicule (VMT) a été calculée à partir des kilométrages indiqués sur les comptes-rendus de deux contrôles successifs. On a calculé la distance annuelle moyenne parcourue ($\text{aveVMT}_{\text{year}}$) en fonction de l'âge du véhicule. On a également calculé la distance annuelle maximale parcourue ($\text{maxVMT}_{\text{year}}$) en fonction de l'âge de véhicule en ajoutant à la moyenne trois fois l'écart-type de la distance annuelle moyenne parcourue ($\text{sigma} \cdot \text{VMT}_{\text{year}}$) :

$$\text{maxVMT}_{\text{year}} = \text{aveVMT}_{\text{year}} + 3\text{sigma} \cdot \text{VMT}_{\text{year}}$$

- iii) Enfin, on a calculé la distance maximale parcourue par chaque véhicule pendant sa durée de vie ($\text{VMT}_{\text{lifé}}$) en additionnant les distances annuelles maximales parcourues ($\text{maxVMT}_{\text{year}}$) :

$$\text{VMT}_{\text{lifé}} (\text{km}) = \sum \text{maxVMT}_{\text{year}}$$

Les données relatives aux véhicules utilitaires ont ensuite été séparées et analysées, car le kilométrage de ces véhicules est plus élevé que celui des voitures particulières ;

- iv) Le nombre de ravitaillements pendant la durée de vie a été calculé en divisant la distance $\text{VMT}_{\text{lifé}}$ par l'intervalle entre deux ravitaillements. Dans la phase 1 du RTM ONU n° 13, on a estimé à 320 km (200 miles)

l'autonomie des voitures particulières et utilitaires légers. Bien que les véhicules à pile à combustible à hydrogène de série aient désormais une autonomie beaucoup plus grande, on a appliqué la même valeur aux véhicules légers par souci de cohérence avec la méthodologie antérieure. Pour les véhicules utilitaires lourds, on a considéré qu'une autonomie de 400 km (250 miles) était plausible, car la contenance de leurs réservoirs, et par conséquent leur autonomie, est plus importante. Bien qu'il soit difficile de définir précisément, à partir des données disponibles, l'intervalle entre deux ravitaillements pour les véhicules utilitaires lourds fonctionnant à l'hydrogène, on peut partir du principe que la valeur de 400 km (250 miles) est suffisamment prudente ;

- v) Enfin, on a filtré les données pour tenir compte des kilométrages supérieurs à la valeur maximale affichable au compteur et pour éliminer les valeurs aberrantes. L'étude définit la valeur plafond effective de la VMT_{year} comme la somme de la VMT_{year} moyenne et de six fois l'écart-type au cours des cinq premières années d'utilisation des véhicules. Les données montrent que la VMT_{year} des premières années de service d'un véhicule est plus élevée que celles des années suivantes, de sorte que les valeurs supérieures à la valeur plafond effective ont été supprimées. Bien qu'il soit presque impossible d'atteindre les valeurs plafond effectives au Japon (1 000 km/jour et 365 000 km/an), elles ont été maintenues, car seuls quelques véhicules étaient proches de cette limite, et leurs effets étaient donc négligeables.
- b) Allemagne – Les données kilométriques disponibles les plus récentes concernant les camions semi-remorques ont été collectées auprès de l'autorité fédérale allemande des transports automobiles (Kraftfahrt-Bundesamt KBA). Les données proviennent des comptes-rendus de contrôle menés de 2014 à 2018 sur les camions semi-remorques neufs au bout d'un an de service. Les données montrent que le kilométrage annuel moyen sur 20 ou 25 ans est inférieur à la moyenne des trois premières années, ce qui est conforme à la pratique du secteur selon laquelle l'utilisation des camions est plus intensive pendant les premières années de service. À la lumière des données, la distance annuelle maximale parcourue par les camions neufs a été adoptée en tant que valeur très prudente pour ce calcul, plutôt que la distance moyenne sur la durée de vie réelle. Les hypothèses sont les suivantes :
- Les camions parcourent le même nombre de kilomètres chaque année pendant toute leur durée de vie (115 017 km par an), ce qui représente un cas d'utilisation extrême ;
 - Le conducteur européen moyen travaille neuf heures par jour ;
 - La vitesse maximale des camions sur les autoroutes allemandes est de 80 km/h ;
 - L'autonomie par plein d'un camion à hydrogène est de 500 km (valeur prudente).

Sur la base des hypothèses ci-dessus, la distance totale parcourue par jour de travail est de 720 km, ce qui correspond à environ 1,5 ravitaillement par jour. Étant donné que la phase 1 du RTM ONU n° 13 ne prenait pas en compte le ravitaillement partiel, ce chiffre a été arrondi à deux. Le nombre de ravitaillements a été calculé sur la base du kilométrage annuel moyen pour une durée de service de 20 ou 25 ans, comme indiqué ci-dessous.

Tableau 2
Résultats de l'étude allemande

Type de véhicule	Durée de service maximale	Kilométrage maximal	Nombre de remplissages pendant toute la durée de vie (« cycles d'essai sous pression »)	Réf : RTM ONU n° 13, phase 2 (proposition)
Utilitaire lourd	20 ans	2 300 340 km	6 390	11 000
Camion semi-remorque	25 ans	2 875 425 km	7 987	11 000

- c) États-Unis – Le National Renewable Energy Laboratory (NREL) a publié en 2021 une étude sur l'état en fin de vie des réservoirs de gaz naturel comprimé (GNC) des véhicules. L'objectif était d'étudier l'intégrité structurelle des réservoirs de GNC dans des conditions nominales de fonctionnement à la fin de leur durée de service, afin d'aider les fabricants « à mieux identifier, comprendre et atténuer les risques pour la sécurité et à relever les défis et exploiter les possibilités du stockage du GNC à bord des véhicules. » La Los Angeles County Metropolitan Transportation Authority, qui gère le réseau de transports en commun du comté de Los Angeles, a fourni au total 60 réservoirs de GNC de type II et de type IV provenant de bus utilisés pendant 15 ans.

Ces réservoirs avaient été qualifiés selon la norme CSA/ANSI NGV 2, mais il n'a pas été possible d'obtenir le dossier complet de chaque réservoir. Néanmoins, on estime que chaque réservoir a été soumis à des cycles de pression variant entre 1 000 et 4 400 psi (environ 7 à 30 MPa), six fois par semaine pendant 15 ans, ce qui représente un total de 4 680 cycles de fatigue au cours de sa durée de vie utile.

Ces réservoirs ont été soumis à un contrôle non destructif (par émission acoustique modale) et à des essais physiques (conformes à la norme CSA/ANSI NGV 2). Vingt des 60 réservoirs ont été directement soumis à un essai d'éclatement afin d'acquérir les connaissances de base en matière d'intégrité structurelle des réservoirs en fin de vie.

Des entailles ont été pratiquées sur 20 autres réservoirs qui ont été soumis à des impacts puis à des cycles de fatigue et à des essais d'éclatement de manière à appréhender la durabilité structurelle. Les vingt derniers réservoirs ont été soumis à un cycle de fatigue hydraulique suivi d'un essai d'éclatement pour simuler une utilisation continue au-delà de la durée de vie prescrite.

Les résultats des essais d'intégrité structurelle menés sur les réservoirs de GNC de type III et de type IV à la fin de leur durée de vie nominale, à savoir 15 ans, donnent à penser qu'« il est possible de continuer à utiliser les réservoirs », étant donné que les 60 réservoirs, bien qu'ayant dépassé leur durée de vie nominale, semblaient structurellement sains d'après les résultats de l'inspection visuelle initiale et de l'examen par émission acoustique modale. Les réservoirs étaient encore capables de résister à la pression d'éclatement requise au moment de leur fabrication, et leur résistance ne s'était pas dégradée de manière significative au cours de leur utilisation en service, comme l'a montré l'essai d'éclatement.

Même après un cycle de fatigue hydraulique supplémentaire, l'intégrité du réservoir, démontrée par l'essai d'éclatement « suggère qu'il est possible d'étendre la durée de vie des réservoirs de GNC au-delà de leur durée de vie nominale ».

79. La prescription actuelle du RTM ONU n° 13, qui fixe à 11 000 le nombre minimal de cycles, est déjà très prudente pour un réservoir dont la durée de vie est de 15 ans. Les données relatives aux camions japonais et allemands en service montrent que la distance totale parcourue en 25 ans, et par conséquent le nombre de cycles de ravitaillement, est très inférieure aux valeurs retenues dans le RTM ONU. En outre, les essais menés sur des réservoirs de GNC en fin de vie qui ont été conçus selon des prescriptions comparables à celles du RTM ONU ont montré que l'intégrité structurelle de ces réservoirs restait acceptable, même après exposition à des dommages et à des cycles supplémentaires. Pour ces raisons, le groupe chargé de la phase 2 a décidé que les prescriptions actuelles du RTM ONU n° 13, qui fixent à 11 000 le nombre minimal de cycles et à 22 000 le nombre de cycles avant éclatement, pouvaient être appliquées à une durée de vie plus longue, à savoir 25 ans.

b) Argumentation concernant le paragraphe 5.1.2 : Essai de vérification de la durabilité des caractéristiques en utilisation sur route (Essais hydrauliques séquentiels)

80. L'essai de vérification de la durabilité des caractéristiques en utilisation sur route permet de s'assurer que le système peut résister à l'éclatement dans des conditions d'utilisation extrêmes, par exemple une fréquence de ravitaillement élevée (éventuellement associée au remplacement des composants de la chaîne de traction) ainsi que l'exposition à des risques matériels et à des environnements difficiles. Les essais de durabilité portent sur la résistance structurelle à l'éclatement. L'attention particulière accordée à la résistance à l'éclatement en conditions extérieures rigoureuses est prescrite pour les raisons suivantes : i) les conséquences d'un éclatement sont particulièrement graves ; et ii) les effets de l'éclatement ne peuvent pas être atténués par des mesures secondaires (contrairement aux fuites, qui peuvent être limitées grâce à un dispositif de détection embarqué associé à des mesures correctives). Ces conditions extrêmes entraînant essentiellement des contraintes et une fatigue structurelles, elles sont simulées à l'aide d'essais hydrauliques, ce qui permet d'exposer le système de manière répétée à ces contraintes dans un délai raisonnable.

i) Hypothèses appliquées lors de l'élaboration du protocole d'essai du paragraphe 5.1.2

81. Ces hypothèses sont les suivantes :

- a) Usage prolongé et intensif dans le cas le plus défavorable = service avec ravitaillements « de vide à plein » exerçant les plus fortes contraintes (125 % de la PSN à 85 °C et 80 % à -40 °C), dans le cadre d'une utilisation prolongée et intensive ; 10 événements de surpression pendant le remplissage ;
- b) Essais séquentiels reproduisant les conditions sur route réelles au cours desquels un même réservoir est soumis à toute une gamme de conditions extrêmes ; il n'est pas réaliste de s'attendre à ce qu'un réservoir soit exposé seulement à certaines conditions pendant toute la durée de vie du véhicule ;
- c) Usage intensif : exposition aux chocs physiques
 - i) Choc résultant d'une chute (par. 5.1.2.2) – le risque de chute est essentiellement lié aux opérations de remplacement du système de stockage d'un véhicule en service, pendant lesquelles le nouveau ou l'ancien système peuvent tomber du chariot élévateur. La procédure d'essai prescrit des chutes selon plusieurs angles depuis la hauteur maximale de levage d'un chariot élévateur. Cet essai est destiné à démontrer que les réservoirs peuvent résister à des chocs représentatifs survenant avant l'installation ;
 - ii) Entailles caractéristiques causées par les brides de fixation (par. 5.1.2.3), qui peuvent provoquer une abrasion grave de la coque en matériau composite. Les réservoirs en métal ne sont pas concernés ;
 - iii) Chocs survenant en circulation routière, qui peuvent entraîner une diminution de la résistance structurelle de la paroi externe ou la détérioration par pénétration des revêtements protecteurs (par exemple, projection de cailloux aux arêtes vives) (par. 5.1.2.3) – cet effet est simulé par le choc d'un pendule ;

- d) Usage intensif : exposition aux agents chimiques présents dans l'environnement routier (par. 5.1.2.4)
- i) Il convient de tenir compte des fluides utilisés à bord du véhicule (électrolyte de batterie et liquide de lave-glace), des substances chimiques utilisées sur les routes ou à proximité (engrais azotés et liquides alcalins) et des liquides utilisés dans les stations de ravitaillement (méthanol et essence) ;
 - ii) La principale cause connue de l'éclatement de réservoirs haute pression (réservoirs à GNC) installés sur des véhicules, autre que l'incendie ou les détériorations physiques, est la rupture par corrosion sous contrainte, phénomène résultant de l'action conjuguée de la pression et de la corrosion par des produits chimiques ;
 - iii) La rupture par corrosion sous contrainte des réservoirs composites en fibre de verre enroulée après exposition à l'électrolyte de batterie des véhicules a été reproduite au moyen du protocole d'essai proposé. D'autres substances chimiques ont été ajoutées au protocole d'essai une fois reconnu le risque générique résultant de l'exposition aux substances chimiques ;
 - iv) La pénétration de corps étrangers dans les revêtements à la suite de chocs et l'usure prévisible en utilisation sur route peuvent entraîner la dégradation de la fonction protectrice des revêtements. Ces phénomènes accroissent le risque de fissuration par corrosion sous contrainte (rupture), qu'il est nécessaire de gérer correctement ;
 - v) Les limites de température ambiante ont été modifiées, la nouvelle plage admissible est de 20 ± 15 °C, sauf indication contraire. La prescription de 20 ± 5 °C correspond à une plage de température d'essai inutilement stricte pour l'enveloppe du réservoir et le fluide qu'il contient. La nouvelle plage admissible autorise une augmentation raisonnable de la température de l'enveloppe et du fluide qui n'est pas susceptible d'endommager un réservoir robuste ou d'affecter matériellement les résultats de l'essai. En outre, ces limites sont conformes à celles spécifiées dans la norme ISO 554:1976 (Atmosphères normales de conditionnement et/ou d'essai – Spécifications) ;
 - vi) L'exposition aux produits chimiques peut être poursuivie jusqu'aux 10 derniers cycles et peut être arrêtée une fois les cycles d'essai terminés. Il a été démontré qu'une prolongation de quelques heures de l'exposition aux produits chimiques n'affectait pas les réservoirs. Cette modification allège le test sans en modifier le niveau d'exigence.
- e) Nombre extrême de cycles de remplissage/vidage du réservoir
- L'argumentation en faveur d'un nombre de cycles d'essai supérieur à 7 500 et inférieur à 11 000 est présentée dans les paragraphes 76 à 79 du point 1 a) *ii) b* de la section E ci-avant.
- f) Conditions de pression extrêmes pour les cycles de remplissage/vidage (par. 5.1.2.4)
- i) La protection contre les surpressions pendant le remplissage est assurée par un système de distribution conçu pour une pression de service maximale autorisée (PSMA) égale à 137,5 % de la PSN, équipé d'un dispositif de protection qui se déclenche à la valeur admissible la plus élevée, soit 137,5 %, et limite les surpressions survenant pendant le remplissage à 150 % de la PSN. Les codes ou les règlements locaux applicables aux stations de distribution peuvent prévoir une valeur admissible plus basse pour le dispositif de protection, mais on estime que 150 % correspond au cas le plus défavorable et, compte tenu des

protections intégrées au système de commande, celui-ci ne devrait se produire qu'en cas de défaillances multiples ;

- ii) On ne dispose pas de données de terrain sur la fréquence des défaillances de stations de ravitaillement haute pression ayant entraîné le déclenchement des systèmes de décompression. L'expérience acquise avec les véhicules à GNC donne à penser que les surpressions survenant pendant le ravitaillement ne représentent pas un risque notable d'éclatement des réservoirs ;
- iii) Pour garantir que les réservoirs sont capables de résister à des surpressions multiples dues aux défaillances des stations de ravitaillement, les prescriptions imposent de démontrer l'absence de fuite après 10 expositions à une pression de remplissage égale à 150 % de la PSN, suivies par une période de stationnement de longue durée sans perte d'étanchéité, puis une nouvelle opération de remplissage/vidage.

- g) Conditions environnementales extrêmes pour les cycles de remplissage/vidage (par. 5.1.2.6)

Les relevés météorologiques montrent que les niveaux de température peuvent être inférieurs ou égaux à -40 °C dans les pays situés au nord du 45° parallèle et atteindre environ 50 °C dans les zones désertiques de pays situés à des latitudes plus basses ; dans l'un et l'autre cas, la fréquence des températures extrêmes est d'environ 5 % dans les zones pour lesquelles on dispose de données officielles vérifiables. Selon les données réelles, on observe des températures minimales inférieures à -30 °C pendant environ 5 % des jours. Par conséquent, une exposition prolongée à des températures inférieures à -30 °C correspond à moins de 5 % de la durée de service du véhicule, compte tenu du fait qu'une température minimale n'est atteinte que pendant quelques heures de la journée. On trouvera des exemples de relevés sur le site suivant (Environnement Canada 1971-2000) :

https://climate.weather.gc.ca/climate_normals/index_e.html#1971

- h) Usage intensif et prolongé

Stationnement réservoir plein à haute température pendant une durée allant jusqu'à 25 ans (exposition prolongée à une pression élevée) (par. 5.1.2.5). Pour éviter d'avoir à effectuer un essai fonctionnel sur une durée de 25 ans, une procédure d'essai accéléré sous haute pression a été mise au point sur la base de données expérimentales sur les métaux et matériaux composites actuellement utilisés, en choisissant le cas le plus défavorable pour la vulnérabilité à la rupture sous contrainte, en l'occurrence celui des composites renforcés par de la fibre de verre. L'utilisation de données de laboratoire pour établir l'équivalence entre un essai de rupture sous contrainte à 100 % de la PSN pendant 25 ans et un essai à 125 % de la PSN pendant 1 000 h (probabilité égale de défaillance par rupture sous contrainte) est décrite dans le document SAE Technical Paper 2009-01-0012 (Sloane, Rationale for Performance-based Validation Testing of Compressed Hydrogen Storage, 2009). Les données de laboratoire disponibles relatives au comportement des fibres composites des réservoirs haute pression (temps avant rupture en fonction de la contrainte statique, sans exposition à des produits corrosifs) sont récapitulées dans la publication Aerospace Corp Report No ATR-92(2743)-1 (1991) et les documents qui y sont cités en référence.

- i) On ne dispose actuellement pas de données fiables sur la durée de stationnement par véhicule à différents taux de remplissage. Les exemples de cas de stationnement prolongé de véhicule réservoir plein incluent les véhicules que leur propriétaire maintient dans cet état, les véhicules abandonnés et les véhicules de collection. C'est pourquoi

le critère retenu pour les prescriptions d'essai est une durée de 25 ans réservoir plein ;

- ii) Les essais sont effectués à +85 °C parce que certains composites présentent un taux de fatigue dépendant de la température (effet qui pourrait être associé à l'oxydation de la résine) (J. Composite Materials, vol. 11, p. 79, 1977). La température d'exposition potentielle maximale a été fixée à +85 °C, car des températures maximales de +82 °C ont été mesurées sous le capot d'un véhicule de couleur sombre garé à l'extérieur sur de l'asphalte, en plein soleil, à une température ambiante de 50 °C. On a également mesuré des températures maximale et moyenne de 87 °C (189 °F) et 70 °C (159 °F), respectivement, à la surface d'un réservoir de gaz comprimé peint en noir, non protégé, placé sur le plateau d'une camionnette noire stationnée en plein soleil par 49 °C ;
 - iii) En ce qui concerne l'utilisation en conditions réelles des réservoirs de GNC, aucun cas de rupture sous contrainte en absence d'exposition à des produits corrosifs (fissuration par corrosion sous contrainte) ou en absence d'anomalie de conception (réservoir fretté mis sous contrainte pour la compression de l'enveloppe sans autofrettage) n'a été signalé. Les essais du paragraphe 5.1.2, incluant un essai d'exposition aux produits chimiques et 1 000 h d'exposition statique à pleine pression, sont destinés à simuler ces cas de défaillance.
- i) Pression d'épreuve en fin de vie (par. 5.1.2.7)
- i) La protection contre les surpressions pendant le remplissage est assurée par une prescription limitant la pression des stations de distribution à 150 % de la PSN. (Cette prescription doit être énoncée dans les codes ou règlements locaux applicables aux stations) ;
 - ii) Des données de laboratoire sur le comportement des fibres composites ont permis de montrer que la probabilité de rupture sous contrainte statique d'un essai à 180 % de la PSN pendant 4 min était équivalente à celle d'un essai à 150 % de la PSN pendant 10 h ; ces valeurs correspondent au cas le plus défavorable (SAE Technical Report 2009-01-0012). Les stations de ravitaillement sont censées limiter les surpressions à 150 % de la PSN ;
 - iii) Les essais « en fin de vie » apportent la garantie que le réservoir résistera à une surpression due à une défaillance de la station de distribution pendant toute la durée de service.
- j) Résistance résiduelle à l'éclatement (par. 5.1.2.8)
- La prescription prévoyant une baisse de moins de 20 % de la valeur de la pression d'éclatement après une exposition à une pression statique de 1 000 h est liée (selon le document SAE Technical Report 2009-01-0012) à la prise en compte d'une tolérance de fabrication de ± 10 % permettant de garantir une résistance à l'éclatement pendant 25 ans à 100 % de la PSN.
- k) Argumentation concernant l'absence d'une prescription d'essai pour le couple de serrage sur l'embase
- Les dommages au réservoir résultant d'erreurs de maintenance n'ont pas été pris en compte parce que ces erreurs, telles que l'application d'un couple de serrage excessif sur l'embase, relèvent des procédures de formation à la maintenance et des outils et mesures de sécurité intrinsèques. De même, les dommages causés par des altérations malveillantes et intentionnelles n'ont pas été pris en compte.

c) Argumentation concernant le paragraphe 5.1.3 : Essai de vérification des caractéristiques attendues en utilisation sur route (Essais pneumatiques séquentiels)

82. L'essai de vérification des caractéristiques attendues en utilisation sur route a pour objet de démontrer l'aptitude du système à assurer les fonctions de sécurité essentielles dans les cas les plus défavorables d'exposition prévisibles. Les expositions « prévisibles » (pour un véhicule typique) incluent les effets du carburant (hydrogène), les conditions environnementales (telles que les températures extrêmes, par exemple) et les conditions d'utilisation normale (telles que le kilométrage total prévu du véhicule au cours de sa durée de service, le kilométrage parcouru par plein, les conditions et la fréquence de remplissage et les conditions de stationnement). Les conditions de service prévisibles incluent une exposition séquentielle aux contraintes liées au stationnement et au ravitaillement, car tous les véhicules sont soumis à ces deux formes d'utilisation et leur aptitude à résister aux effets cumulatifs de celles-ci est nécessaire pour garantir la sécurité d'utilisation de tous les véhicules pendant la durée de service attendue.

83. Les essais pneumatiques à l'hydrogène gazeux permettent de soumettre le réservoir aux facteurs de contrainte associés à des variations rapides et simultanées de pression et de température intérieures et à l'infusion de l'hydrogène dans les matériaux constituant le réservoir. Par conséquent, les essais pneumatiques concernent surtout l'intérieur du réservoir et visent avant tout à vérifier la résistance aux fuites. Une défaillance par fuite peut être atténuée, au moins en partie, par des mesures de protection secondaires – surveillance et arrêt du véhicule lorsque c'est justifié (maintien du risque d'inflammabilité dans un garage en deçà d'un niveau très prudent), ce qui devrait garantir que les réparations seront effectuées largement à temps avant que la fuite puisse s'aggraver, puisque le véhicule est mis hors service. Aux fins du protocole d'essai, un débit de fuite maximal admissible a été défini conformément à l'alinéa c) du paragraphe 5.1.3.3.

84. Le système de stockage du carburant du véhicule peut comporter plus d'un système de stockage d'hydrogène comprimé complet et fonctionnellement indépendant, tel que défini au paragraphe 3.8. Un tel système de stockage de carburant pour véhicules contenant des éléments identiques (c'est-à-dire deux ou plusieurs systèmes de stockage d'hydrogène comprimé constitués de réservoirs de mêmes dimensions et des mêmes composants) devrait pouvoir être qualifié sur la base d'un essai pneumatique séquentiel portant sur un seul système de stockage d'hydrogène comprimé.

85. Les données utilisées pour l'élaboration du protocole d'essai du paragraphe 5.1.3 incluent les critères suivants :

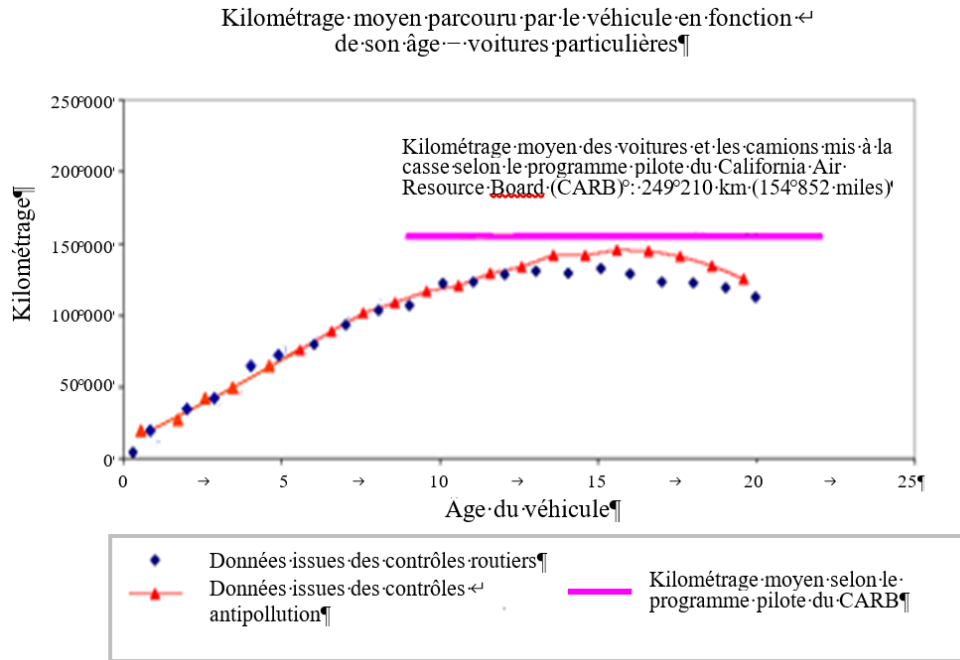
- a) Essai de pression d'épreuve (par. 5.1.3.1) – la production en série de réservoirs sous pression inclut un essai de vérification (ou essai de pression d'épreuve) sur le lieu de production. La pression appliquée conformément aux pratiques du secteur est égale à 150 % de la PSN, c'est-à-dire 20 % supérieure à la pression de service maximale ;
- b) Maintien de l'étanchéité par conditions climatiques rigoureuses (par. 5.1.3.2)
 - i) Conditions environnementales prévues – Les relevés météorologiques montrent que les niveaux de température peuvent être inférieurs ou égaux à -40 °C dans les pays situés au nord du 45° parallèle et atteindre environ 50 °C dans les zones désertiques de pays situés à des latitudes plus basses ; dans l'un et l'autre cas, la fréquence des températures extrêmes est d'environ 5 % dans les zones pour lesquelles on dispose de données officielles vérifiables. Selon les données réelles, on observe des températures minimales inférieures à -30 °C pendant environ 5 % des jours. Par conséquent, une exposition prolongée à des températures inférieures à -30 °C correspond à moins de 5 % de la durée de service du véhicule, compte tenu du fait qu'une température minimale n'est atteinte que pendant quelques heures de la journée. On trouvera des exemples de relevés sur le site suivant (Environnement Canada 1971-2000) :

https://climate.weather.gc.ca/climate_normals/index_e.html#1971 ;

- ii) Nombre de cycles de remplissage/vidage
 - a. Le nombre de remplissages complets à exécuter pour démontrer l'aptitude du réservoir à fonctionner sans perte d'étanchéité pendant la durée de service prévue est fixé à 500 :
 - i. Le kilométrage total prévu du véhicule est fixé à 250 000 km (155 000 miles) ;

Figure 9

Kilométrage moyen parcouru par le véhicule en fonction de son âge



Source : (Sierra Research Report No. SR2004-09-04, Review of the August 2004 Proposed CARB Regulations to Control Greenhouse Gas Emissions from Motor Vehicles: Cost Effectiveness for the Vehicle Owner or Operator, 22 septembre 2004).

- ii. L'autonomie par plein prévue est considérée comme supérieure ou égale à 500 km (300 miles) (chiffre basé sur les données commerciales 2006-2007 des grands constructeurs de voitures particulières en Europe, Japon et Amérique du Nord) ;
- iii. 500 cycles correspondent à 250 000 km (150 000 miles), à raison de 500 km (300 miles)/cycle ;
- iv. L'autonomie par plein de certains véhicules peut être moindre, ce qui, à kilométrage égal et en l'absence de remplissages partiels, se traduit par un nombre de pleins supérieur à 500 au cours de la durée de vie du véhicule. La démonstration de la capacité à résister à 500 remplissages complets sans perte d'étanchéité est nécessaire pour prouver l'aptitude fondamentale du système à l'utilisation sur route. Les effets d'une perte d'étanchéité peuvent cependant être atténués par des mesures secondaires, à savoir la détection des fuites et l'arrêt du véhicule, avant de poser des risques pour la sécurité ;

- v. Étant donné que la contrainte engendrée par les remplissages complets est supérieure à celle résultant des remplissages partiels, l'essai de vérification de la conception permet de démontrer avec une marge de fiabilité considérable la capacité à résister aux remplissages/vidages sans perte d'étanchéité.
- b. La prescription prévoyant 500 cycles de pression pneumatique pour la qualification est conforme au principe de prudence au regard des défaillances observées en circulation réelle et lors des essais :
 - i. Expérience acquise en conditions réelles : des systèmes de stockage d'hydrogène de PSN égale à 70 MPa ont présenté des fuites au niveau du joint torique au cours d'une brève utilisation sur route de véhicules prototypes (moins de 50 remplissages complets) ;
 - ii. Expérience acquise en conditions réelles : des systèmes de stockage d'hydrogène de PSN égale à 70 MPa ont présenté des pertes d'étanchéité temporaires (avec rétablissement ultérieur) au cours d'une brève utilisation sur route de véhicules prototypes (moins de 50 remplissages complets) ;
 - iii. Expérience acquise en conditions réelles : des défaillances mécaniques de systèmes de stockage de GNC associées à une intrusion de gaz dans l'enveloppe interne du réservoir et les couches enroulées formant sa coque ont été constatées au cours d'une brève utilisation sur route des véhicules (moins de 50 remplissages complets) ;
 - iv. Expérience acquise en conditions réelles : les défaillances des systèmes de stockage de GNC associées à la détérioration de l'enveloppe interne par effet corona en raison de l'accumulation de charges statiques à l'intérieur de celle-ci ne sont pas imputables au réservoir, car les charges statiques sont véhiculées dans ce dernier par les impuretés (particules) présentes dans le carburant. Les prescriptions de la norme ISO 14687-2 (et SAE J2719) sur les carburants limitent toutefois les concentrations de particules dans l'hydrogène carburant. En outre, les systèmes de piles à combustible ne sont pas tolérants aux impuretés sous forme de particules, dont la présence dans le carburant est susceptible de causer la mise hors service des véhicules ;
 - v. Expérience acquise lors des essais : des défaillances mécaniques des systèmes de stockage associées à une intrusion de gaz dans l'enveloppe interne du réservoir et les couches enroulées formant sa coque ont été constatées au bout d'environ 50 remplissages complets ;
 - vi. Expérience acquise lors des essais : des systèmes de stockage d'hydrogène dont la PSN est égale à 70 MPa qui avaient été qualifiés selon la norme CSA/ANSI NGV 2 ont présenté des défaillances dans les conditions d'essais énoncées au paragraphe 5.1.3, c'est-à-dire des défaillances susceptibles de se produire en utilisation sur route. Le rapport Powertech (McDougal, M., SAE J2579 Validation Testing Program Powertech Final Report, National Renewable Energy Laboratory Report

No. SR-5600-49867 (www.nrel.gov/docs/fy11osti/49867.pdf) fait état de deux défaillances de systèmes comportant des réservoirs qui avaient été qualifiés pour le service : une fuite au niveau de la vanne sur un réservoir composite à enveloppe interne en métal et une fuite au niveau de l'électrovane située à l'intérieur du réservoir, et une perte d'étanchéité sur un réservoir composite à enveloppe interne en polymère due à une défaillance de l'enveloppe. La défaillance par perte d'étanchéité sur le réservoir composite à enveloppe interne en polymère concernait un réservoir qui avait été qualifié selon la norme CSA/ANSI NGV 2, modifiée pour l'hydrogène. La défaillance de la vanne du réservoir composite à enveloppe interne en métal concernait une vanne qualifiée selon la norme EIHP rev12b. Conclusion du rapport : « Les essais séquentiels de la norme SAE TIR J2579 ont révélé que les réservoirs pour lesquels aucune défaillance en service n'était signalée, soit satisfont aux prescriptions des essais, soit échouent pour des raisons qui sont compréhensibles et qui sont représentatives des conditions futures de service. ».

iii) Conditions de remplissage

- a. La durée de remplissage a été fixée à l'origine à 3 minutes, car cela correspondait au remplissage le plus rapide « de vide à plein » à 70 MPa avec du carburant à -40 °C ; cependant, l'application de la pression d'essai une seule fois pendant trois minutes constitue une simplification excessive du processus de remplissage réel, qui entraîne souvent un remplissage du réservoir supérieur à 100 % de sa capacité. Par conséquent, le tableau 7b a été élaboré sur la base de la norme SAE J2601 (Fuelling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles) et inséré dans le paragraphe 6.2.4.1 afin de fournir des vitesses de montée en pression plus appropriées en fonction du volume du système de stockage d'hydrogène comprimé pour les différentes conditions de température ambiante et de ravitaillement en carburant qui sont évaluées dans le protocole d'essai.

La norme SAE J2601 portant sur le ravitaillement des voitures particulières et utilitaires légers, les valeurs indiquées dans les tableaux ont été prudemment extrapolées à des réservoirs de système de stockage d'hydrogène comprimé de plus grand volume à l'aide de la formule figurant dans la norme. En outre, dans le cas des systèmes de stockage d'hydrogène comprimé de 50 et 100 l à des températures ambiantes de 20 °C et 50 °C, les vitesses de montée en pression ont été ajustées pour tenir compte des différences entre les stations de distribution, où l'importante masse thermique des dispositifs de dégagement, des tuyaux de distribution, des buses et des réservoirs (c'est-à-dire la masse de ces éléments multipliée par leur chaleur massique) peut affecter négativement la température du carburant lors des opérations de remplissage, et les laboratoires d'essai qui n'ont pas besoin de ces équipements ou qui ne les utilisent pas.

Du fait de cet ajustement, qui concerne les petits réservoirs, plus le volume du système de stockage d'hydrogène comprimé est important, plus la vitesse de montée en pression est faible (voir tableau 7b au paragraphe 6.2.4.1) ; par conséquent, la valeur de la vitesse de montée en pression obtenue à partir du volume de

l'unique réservoir soumis à l'essai est volontairement sous-estimée. Toutefois, si la température interne mesurée dans le réservoir dépasse 85 °C, la vitesse de montée en pression peut être réduite pour maintenir la température interne au niveau requis. Par ailleurs, il est possible de recourir à la disposition de l'alinéa c) du paragraphe 6.2.4.1. concernant les dispositifs ou les commandes du véhicule pour protéger le système de stockage d'hydrogène comprimé contre les températures internes extrêmes.

S'agissant du ravitaillement à température ambiante, les tableaux H70TA de la norme SAE J2601/4 (en cours d'élaboration) seront le moment venu utilisés dans le tableau 7b. En attendant la publication de la norme SAE J2601/4, les vitesses de montée en pression figurant dans le tableau 7b du paragraphe 6.2.4.1 ont été calculées à l'aide de la norme SAE J2601 ;

- b. Les conditions de choc thermique maximales prévues correspondent à un système stabilisé à une température ambiante d'environ 50 °C et soumis à un remplissage avec un carburant à -40 °C, et à un système stabilisé à -40 °C soumis à un remplissage effectué par un particulier dans un local à environ +20 °C ;
- c. Le système est soumis alternativement aux contraintes liées au remplissage et aux contraintes liées au stationnement ;
- d. La température ambiante des essais de cycles de pression avec du gaz froid passe de -40 °C à -25 °C. La valeur de -25 °C correspond à des conditions de fonctionnement plus réalistes s'agissant des vitesses de vidage du réservoir requises dans l'essai. Cette logique est déjà appliquée aux essais de cycles de pression avec du gaz chaud, qui prévoient une température ambiante de +50 °C, alors que les composants sont évalués à +85 °C. Une étude de la NHTSA a montré que les essais donnent les mêmes résultats à -40 °C qu'à -25 °C (McDougall, M., & Stephens, D., Cumulative fuel system life cycle and durability testing of hydrogen containers, Report No. DOT HS 811 832, National Highway Traffic Safety Administration, Washington, août 2013). Cette modification ne compromet pas l'objectif de sécurité de l'essai, car la température du gaz à l'intérieur du réservoir atteint -40 °C, et les conditions de froid extrême à l'intérieur de celui-ci sont déjà appliquées dans les essais de cycle de pression hydraulique, qui sont menés à +85 °C et -40 °C. En outre, cette modification simplifie la tâche des laboratoires d'essai, la performance des composants étant réduite à -40 °C ;
- e. La température du gaz pour les cycles de pression avec du gaz froid, qui était ≤ -40 °C, est remplacée par une plage comprise entre -33 °C et -40 °C pendant les 30 premières secondes du ravitaillement. Cela est conforme aux protocoles de ravitaillement en gaz T40 de la norme SAE J2601 ;
- f. Des procédures d'essai (paragraphe 6.2.3.6 et 6.2.3.7) ont été ajoutées pour les essais de cycles de pression à des températures extrêmes, y compris des informations sur les mesures de température dans l'environnement et dans le fluide. Aucune prescription n'a été modifiée, mais des descriptions détaillées des étapes ont été incluses afin de faciliter la compréhension de

l'exécution de l'essai tout en assurant la cohérence avec les procédures décrites au paragraphe 6.2.3.

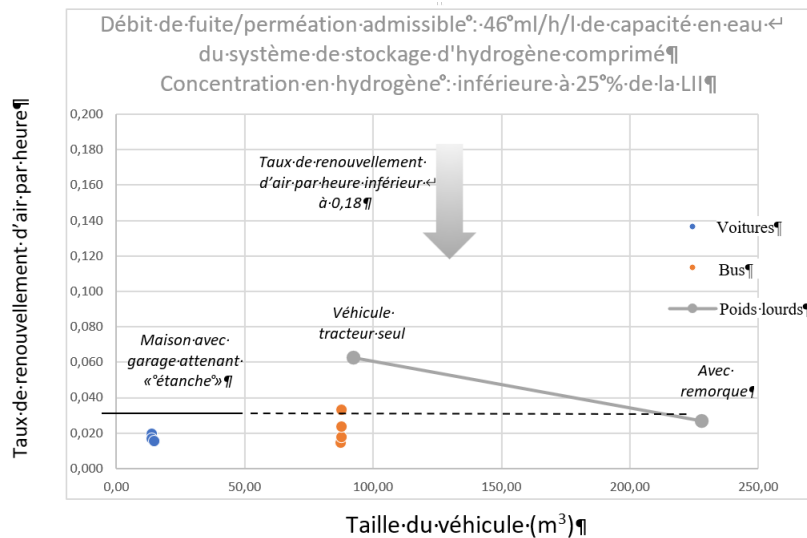
- c) Stationnement réservoir plein sans perte d'étanchéité (par. 5.1.3.3)
- i) Les fuites et la perméation sont des facteurs de risque d'incendie lors du stationnement dans les espaces confinés tels que les garages ;
 - ii) Le débit de fuite/perméation admissible est fonction des nombreuses combinaisons possibles de véhicules et de garages, et des conditions d'essai associées. Le débit de fuite/perméation admissible est fixé de manière à ce que la concentration d'hydrogène reste en dessous du seuil de 25 % de la limite inférieure d'inflammabilité (LII). Le seuil très prudent de 25 % de la LII est adopté par convention comme concentration maximale pour tenir compte de l'inhomogénéité de concentration et équivaut à une concentration d'hydrogène de 1 % dans l'air. Des données concernant le comportement de dispersion de l'hydrogène, les scénarios envisageables en ce qui concerne le garage et le véhicule, y compris les dimensions du garage, le taux de renouvellement d'air et la température, ainsi que les méthodes de calcul sont présentés dans l'étude de référence ci-après élaborée dans le cadre du Réseau d'excellence européen HySafe : P. Adams, A. Bengaouer, B. Cariteau, V. Molkov et A. G. Venetsanos, Allowable hydrogen permeation rate from road vehicles, Int. Journal of Hydrogen Energy, volume 36, numéro 3, p. 2742 à 2749, 2011 ;
 - iii) On considère que, dans les conditions les plus défavorables, le taux de renouvellement d'air par heure assuré par la ventilation dans les structures où les véhicules à hydrogène sont susceptibles de stationner est égal ou inférieur à 0,18, mais la valeur de conception exacte dépend fortement du type et de l'emplacement des structures concernées. Dans le cas des voitures particulières et utilitaires légers, on a mesuré un taux de renouvellement par heure extrêmement faible, à savoir 0,03, dans des structures à ossature bois « étanches » (avec des pare-vapeur en plastique, des joints d'étanchéité sur les portes et pas d'ouvertures d'aération) qui sont à l'abri du vent et très chaudes (55 °C) avec peu de variations quotidiennes de température pouvant entraîner des infiltrations d'air dues à la densité. Le débit de fuite/perméation maximal pour les voitures particulières et les utilitaires légers est de 150 ml/min (mesuré à 115 % de la PSN pour un remplissage complet à 55 °C) pour un garage de 30,4 m³. Le débit de fuite/perméation maximal étant en gros proportionnel à la taille du véhicule, le facteur d'échelle

$$R = (V_{\text{width}} + 1) \times (V_{\text{height}} + 0,5) \times (V_{\text{length}} + 1)/30,4$$
 où V_{length} , V_{width} et V_{height} sont respectivement la longueur, la largeur et la hauteur du véhicule, exprimées en mètres, permet de calculer le débit de fuite/perméation maximal pour d'autres combinaisons garage/véhicule que celles utilisées pour déterminer la valeur de 150 ml/min mentionnée ci-dessus.
 - iv) Les prescriptions relatives aux débits de fuite/perméation de l'ensemble du véhicule énoncées ci-dessus sont cohérentes avec les propositions élaborées par HySafe (voir point c) ii) du paragraphe 85). Toutefois, pour faciliter les essais de conformité, ces prescriptions ont été exprimées sous la forme d'un débit de fuite/perméation admissible pour chaque réservoir du système de stockage et non d'un débit de fuite/perméation maximal pour l'ensemble du véhicule (au point iii) ci-dessus) afin d'assurer la cohérence avec les propositions élaborées par HySafe. Dans ce cas, le débit de fuite/perméation admissible mesuré à 55 °C et à 115 % de la PSN est fixé à 46 ml/h/l de capacité en eau de chaque réservoir du système de stockage, de manière à respecter le débit

de fuite/perméation maximal pour l'ensemble du véhicule. Cette valeur limite est applicable aux voitures particulières et utilitaires légers de taille inférieure ou supérieure au véhicule de référence décrite au point iii) ci-dessus. Ainsi, pour un système de stockage de capacité totale en eau inférieure ou égale à 330 l et un garage de 50 m³, la prescription fixant le débit de fuite/perméation maximal à 46 ml/h/l de capacité en eau donne une concentration d'hydrogène d'au plus 1 % dans des conditions stabilisées. Ce résultat se démontre en comparant les débits de fuite/perméation admissibles obtenus selon les deux méthodes : le débit de fuite/perméation du véhicule, calculé en utilisant la valeur prescrite de 46 ml/h/l de capacité en eau des réservoirs du système de stockage, est égal à 46 ml/h/l x 330 l/(60 min/h) = 253 ml/min ; le débit de fuite/perméation pour un garage de 50 m³ et un taux de renouvellement d'air par heure égal à 0,03, est égal à 150 ml/min x 50 m³/30,4 m³ = 247 ml/min. Ces valeurs étant pratiquement identiques, on peut conclure que la concentration d'hydrogène dans le garage ne devrait pas dépasser 1 % pour une voiture particulière ou un utilitaire léger équipés de systèmes de stockage de 330 litres (ou moins) stationnés dans un garage de 50 m³ ;

- v) Le calcul faisant appel à la valeur prescrite de 46 ml/h/l de capacité en eau des réservoirs du système de stockage est suffisamment prudent pour être applicable aux véhicules utilitaires lourds. La figure 10 montre le taux de renouvellement d'air par heure requis pour le garage en fonction de la taille du véhicule. Des exemples de véhicules existants ou en projet sont présentés sur la figure. Les voitures particulières et les utilitaires légers, qui sont susceptibles de stationner dans des garages étanches et très chauds où le taux de renouvellement d'air par heure peut descendre jusqu'à 0,03 (voir ci-dessus), devraient respecter le seuil de 25 % de la LII de l'hydrogène, quelle que soit leur taille. La plupart des véhicules utilitaires lourds nécessitent également un taux de renouvellement d'air par heure de 0,03 (ou moins), même s'ils ne sont pas censés être garés dans des garages aussi « étanches » que les voitures particulières et les utilitaires légers. Étant donné que les véhicules utilitaires lourds sont en principe utilisés dans des espaces plus ouverts (ventilés naturellement) ou ventilés mécaniquement, la prescription fixant le débit de fuite/perméation maximal à 46 ml/h/l de capacité en eau des réservoirs du système de stockage offre une marge raisonnable en cas de défaillance de la ventilation mécanique, par exemple, sans qu'il soit nécessaire d'adopter une valeur différente de celle déjà établie pour les voitures particulières et utilitaires légers ;

Figure 10
Prescriptions relatives à la ventilation de l'espace entourant le véhicule



- vi) La pression maximale d'un réservoir entièrement rempli à 55 °C est égale à 115 % de la PSN (charge équivalente à celle obtenue à 125 % de la PSN à 85 °C et 100 % de la PSN à 15 °C) ;
 - vii) Un essai de recherche de fuite doit être exécuté pour vérifier que le réservoir ne présente aucune fuite externe susceptible d'entretenir une flamme qui pourrait dégrader les matériaux qui le composent et causer ultérieurement une défaillance de confinement. D'après le rapport Technical Report 2008-01-0726 (Flame Quenching Limits of Hydrogen Leaks), une fuite d'hydrogène provenant d'un raccord à compression typique ne peut pas entretenir de flamme si le débit massique est inférieur à 0,028 mg/s ; cette valeur est ramenée à 0,005 mg/s pour un brûleur miniature. Le cas du brûleur miniature étant considéré comme le plus défavorable, le débit de fuite maximal est fixé à 0,005 mg/s ;
 - viii) Le stationnement prolongé du véhicule favorise la saturation en hydrogène des couches enroulées formant la coque du réservoir, de l'interface entre la coque et l'enveloppe interne, des matériaux composant l'enveloppe, des emboîtures, des joints toriques et des raccords. Les contraintes de remplissage sont appliquées avec et sans exposition à la saturation par l'hydrogène. La saturation par l'hydrogène est atteinte lorsque la perméation atteint un état stationnaire ;
 - ix) L'essai de vérification de la perméation, dont les critères de qualification correspondent aux pires conditions plausibles en matière d'élévation de température, de cycles de pression et de saturation par l'hydrogène, permet de lever les incertitudes sur la relation entre perméation et température et sur la détérioration à long terme au fil du temps et de l'utilisation.
- d) Pression d'épreuve en fin de vie (par. 5.1.3.4)
- i) La protection contre les surpressions pendant le remplissage est assurée par une prescription limitant la pression des stations de distribution à 150 % de la PSN au maximum. (Cette prescription doit être énoncée dans les codes ou règlements locaux applicables aux stations) ;

- ii) Des données de laboratoire sur le comportement des fibres composites ont permis de montrer que la probabilité de rupture sous contrainte statique d'un essai à 180 % de la PSN pendant 4 min était équivalente à celle d'un essai à 150 % de la PSN pendant 10 h ; ces valeurs correspondent au cas le plus défavorable (SAE Technical Report 2009-01-0012). Les stations de ravitaillement sont censées assurer une protection contre les surpressions dépassant 150 % de la PSN ;
 - iii) On ne dispose pas de données de terrain sur la fréquence des défaillances de stations de ravitaillement haute pression ayant entraîné le déclenchement des dispositifs de décompression. Le petit nombre de stations de ravitaillement à 70 MPa existantes ne permet pas d'établir de statistiques fiables.
- e) Résistance résiduelle à l'éclatement (par. 5.1.3.5)

La prescription prévoyant une baisse de moins de 20 % de la valeur de la pression d'éclatement après la durée de service prévue a pour objet de garantir la stabilité des composants structuraux assurant la résistance à l'éclatement ; elle tient compte (selon le document SAE Technical Report 2009-01-0012) d'une tolérance de fabrication de ± 10 % permettant de garantir une résistance à l'éclatement pendant plus de 25 ans à 100 % de la PSN, conformément au paragraphe 5.1.2.5.

Il est suggéré de s'intéresser à la question de la détérioration des enveloppes internes des réservoirs et de les inspecter après l'essai d'éclatement. Cela permettrait de mettre en évidence les détériorations de l'enveloppe interne et du raccordement enveloppe/embase, telles que la fissuration par fatigue, le décollement des couches plastiques, la détérioration du joint ou les dommages causés par des décharges électrostatiques. Le rapport des constatations devrait être communiqué au fabricant.

Les organismes de contrôle et les constructeurs devraient en principe surveiller l'état et les caractéristiques des systèmes de stockage au cours de leur durée de service, ce qui leur permettrait de vérifier régulièrement de manière concrète et adéquate que les prescriptions fonctionnelles du paragraphe 5.1.3 répondent aux besoins de l'utilisation sur route. Ce conseil vise à encourager les organismes de contrôle et les constructeurs à poursuivre la collecte de nouvelles données.

d) Argumentation concernant les paragraphes 5.1.4 et 6.2.5 : Essai de vérification du comportement au feu : feu localisé/enveloppant (conditions justifiant le retrait du service)

86. La vérification du comportement dans les conditions justifiant le retrait du service vise à prévenir la rupture du réservoir dans des conditions difficiles. L'incendie est la seule condition justifiant le retrait du service prise en compte pour la qualification et la conception.

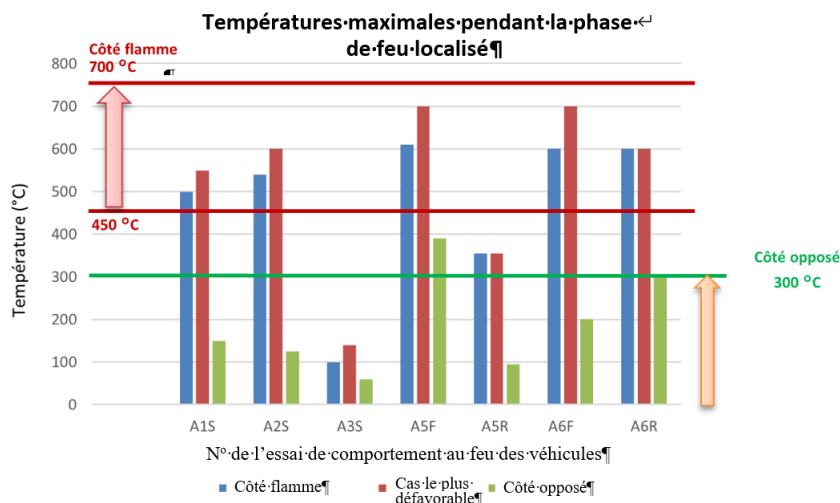
87. Un examen approfondi des cas de défaillance de réservoirs GNC en service au cours de la dernière décennie (Scheffler, McClory et al., Establishing Localized Fire Test Methods and Progressing Safety Standards for FCVs and Hydrogen Vehicles, SAE Technical Paper 2011-01-0251) a révélé que, si une partie des incendies s'étaient produits sur des systèmes de stockage qui n'étaient pas équipés de dispositifs de décompression thermocommandés correctement conçus, dans la majorité des cas, les dispositifs de décompression thermocommandés ne s'étaient pas déclenchés, car ils n'avaient pas été installés correctement et n'avaient pas détecté la chaleur, en dépit du fait que le feu localisé avait attaqué la paroi du réservoir, ce qui avait fini par causer l'éclatement de celui-ci. Le cas de l'exposition à un feu localisé, en effet, n'avait pas été traité dans les règlements ou normes antérieurs. La méthode d'essai au feu décrite au paragraphe 6.2.5 traite à la fois de l'exposition à un feu localisé et à un feu enveloppant.

88. Les conditions de l'essai au feu décrites au paragraphe 6.2.5 sont basées sur des essais portant sur l'ensemble du véhicule menés par le Japanese Automobile Research Institute (JARI) et les constructeurs américains. Un récapitulatif des données est présenté dans le document SAE Technical Paper 2011-01-0251. Dans le cadre des travaux préparatoires relatifs au présent Règlement, le document et les données ont été examinés afin d'améliorer la reproductibilité des résultats des essais au feu. Les principales constatations sont résumées ci-après :

- a) Dans environ 30 à 50 % des cas, les essais de comportement au feu des véhicules ont été menés dans des conditions correspondant à la catégorie « feu localisé », car les données indiquent qu'un réservoir de gaz comprimé en matériaux composites pouvait avoir subi des dégâts localisés avant que les dispositifs de décompression thermocommandés classiques montés sur l'embase (c'est-à-dire loin du point d'exposition aux flammes) se déclenchent. La température de 300 °C a été retenue comme seuil de déclenchement d'un feu localisé, car l'analyse thermogravimétrique indique que le matériau du réservoir composite commence à se dégrader rapidement à cette température ;
- b) Alors que les feux des essais en laboratoire brûlaient souvent pendant 30 à 60 min, le délai s'écoulant avant dégradation des réservoirs lors des essais de feu localisé était inférieur à 10 min ;
- c) Comme le montre la figure 11, les pics de température à la surface des réservoirs utilisés pour les essais de comportement au feu des véhicules ont atteint 700 °C pendant la phase de feu localisé. Bien que cette température ne soit pas aussi élevée que celles qui ont été observées ultérieurement au cours de la phase de feu enveloppant, elle est suffisante pour entraîner une grave détérioration des matériaux et compromettre la capacité des dispositifs de décompression thermocommandés (TPRD) à se déclencher et à purger le réservoir ;

Figure 11

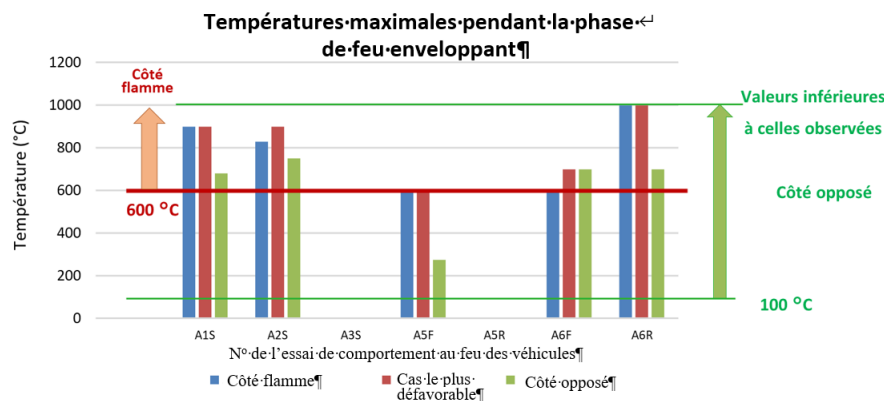
Températures des réservoirs d'essai pendant la phase de feu localisé des essais de comportement au feu des véhicules



- d) L'augmentation des pics de température à la fin de la phase de feu localisé marquait souvent la transition vers la phase de feu enveloppant ;
- e) Comme illustré à la figure 12, les pics de température à la surface des réservoirs utilisés pour les essais de comportement au feu des véhicules ont atteint 1 000 °C au cours de la phase de feu enveloppant ;

Figure 12

Températures des réservoirs d'essai pendant la phase de feu enveloppant des essais de comportement au feu des véhicules



89. Sur la base des constatations ci-dessus, des limites fondées sur les performances ont été définies pour caractériser l'exposition thermique pendant les phases de feu localisé et de feu enveloppant ; ces limites sont illustrées aux figures 11 et 12. La température de surface maximale côté flamme du réservoir d'essai pendant la phase de feu localisé a été fixée à 50 °C au-dessus de la valeur la plus élevée enregistrée pendant les essais de comportement au feu des véhicules menés par le JARI, afin de disposer d'une marge pour les essais. Il n'est pas nécessaire de fixer une valeur maximale pour la phase de feu enveloppant, car la température est naturellement limitée par la température de la flamme. La température de surface minimale côté flamme a été fixée à la valeur la plus basse enregistrée pendant la phase de feu enveloppant, mais a été limitée à un écart-type en dessous de la moyenne pendant la phase de feu localisé, afin de maintenir des conditions thermiques difficiles (mais raisonnables) même en cas de biais important de l'ensemble des données.

90. Les essais de comportement au feu des réservoirs ont montré qu'il est également nécessaire de contrôler la température de surface du côté opposé aux flammes afin de minimiser la variabilité des essais d'un site à l'autre ; en effet, les différences de longueur de flammes peuvent accidentellement conduire à des températures supérieures à celles observées du côté opposé aux flammes lors des essais menés par le JARI et provoquer par la suite une dégradation excessive du matériau de la surface supérieure du réservoir et, dans certains cas, un déclenchement prématuré du (des) TPRD. C'est pour cette raison que les valeurs des températures minimale et maximale admissibles pour la phase de feu enveloppant sont basées sur la série de données obtenues lors des essais de comportement au feu des véhicules, et que les valeurs des températures minimale et maximale pour la phase de feu localisé ont été limitées à un peu moins d'un écart-type par rapport à la moyenne afin de maintenir des conditions thermiques difficiles (mais raisonnables).

91. Les limites de température indiquées aux figures 11 et 12 ont également été utilisées pour établir les températures maximales et minimales admissibles dans le cadre de la mise au point et de la vérification du brûleur utilisé pour les essais au feu, qui figurent dans le tableau 10 de la partie II. Étant donné que le réservoir est placé horizontalement au-dessus du brûleur pour l'essai au feu (voir la figure 13), que la surface inférieure du réservoir est exposée aux flammes et que sa surface supérieure se trouve du côté opposé, le tableau 10 de la partie II définit les critères concernant les surfaces inférieure et supérieure du réservoir, car cette terminologie est cohérente avec celle de l'essai de comportement au feu du réservoir. De même, on a retenu la température maximale de la surface inférieure du réservoir pour les thermocouples situés au centre de la surface inférieure du réservoir et à mi-hauteur de ses côtés, car tous ces emplacements sont représentatifs de l'exposition thermique du côté exposé aux flammes pendant les essais de comportement au feu des véhicules menés par le JARI.

Figure 13
Essais de comportement au feu d'un réservoir



92. Le combustible sélectionné pour alimenter le brûleur d'essai est le gaz de pétrole liquéfié (GPL), car il est disponible dans le monde entier et sa souplesse d'utilisation permet de maintenir les conditions thermiques requises pendant les phases de feu localisé et de feu enveloppant. On a estimé que le recours au GPL permettait de reproduire les conditions thermiques des essais de comportement au feu des véhicules (voir fig. 11 et 12) et d'y soumettre des réservoirs sans craindre la formation de carbone (cokéfaction) susceptible de se produire avec les combustibles liquides. Par ailleurs, en raison du ratio H/C relativement faible (environ 2,67) du GPL, la flamme produite présente des caractéristiques de rayonnement plus proches de celles des feux d'hydrocarbures, dont le ratio H/C est proche de 2,1, que du gaz naturel, par exemple, dont le ratio H/C est d'environ 4,0.

93. Le brûleur décrit au paragraphe 6.2.5.3, qui comporte deux zones correspondant respectivement au feu localisé et au feu enveloppant, a été mis au point et vérifié conformément aux dispositions du tableau 10 de la partie II afin que les laboratoires d'essai puissent procéder au montage et aux essais sans être obligés de mener un programme de mise au point des brûleurs. L'utilisation d'un brûleur normalisé pour les essais au feu est considérée comme un moyen concret de réduire la variabilité des résultats grâce à des équipements présentant des caractéristiques comparables.

94. Un exemple de brûleur est présenté aux figures 14 et 15. Le brûleur peut être construit à partir de tuyaux ou de tubes, de raccords et de buses disponibles dans le commerce. Voir la figure 16 et le tableau 3. Les buses mentionnées dans le tableau 3 sont disponibles dans le commerce. Les laboratoires d'essai doivent vérifier qu'elles sont conformes aux spécifications du tableau 8 de la partie II en procédant à une inspection ou à une vérification sur banc afin de garantir que le flux de gaz, et par conséquent la chaleur émise par les zones du brûleur, est réparti de manière homogène.

Figure 14
Buses de prémélange prescrites de type Bunsen

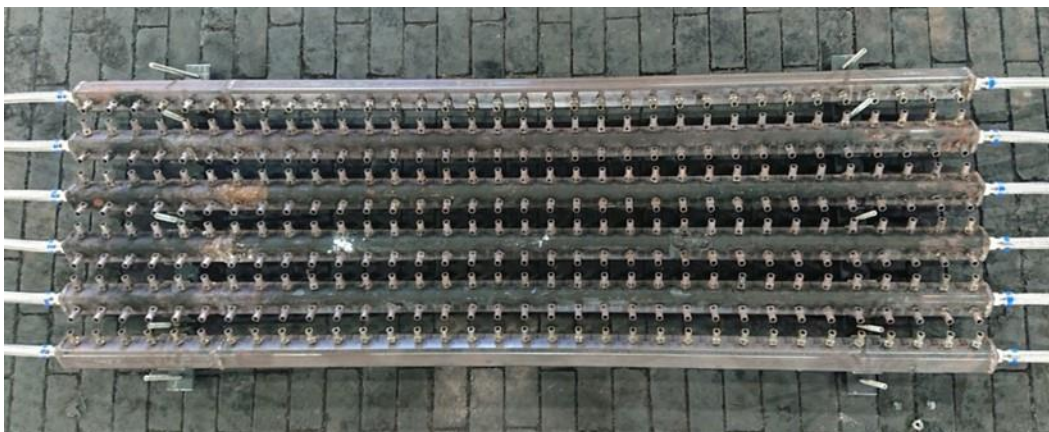


Figure 15
Disposition prescrite des buses de prémélange du brûleur



Figure 16
Buses du brûleur



Tableau 3
Caractéristiques des buses du brûleur prescrit

<i>Élément</i>	<i>Description</i>
Nom de la buse	Embout en acier inoxydable pour brûleur-jet (gaz propane)
Fabricant	Thermova – Ningbo, Chine
Marque	Fabricant
Numéro de référence de la pièce	ZZ15002
Raccordement de la buse	Filetage UNF 5/16-24 (à visser)

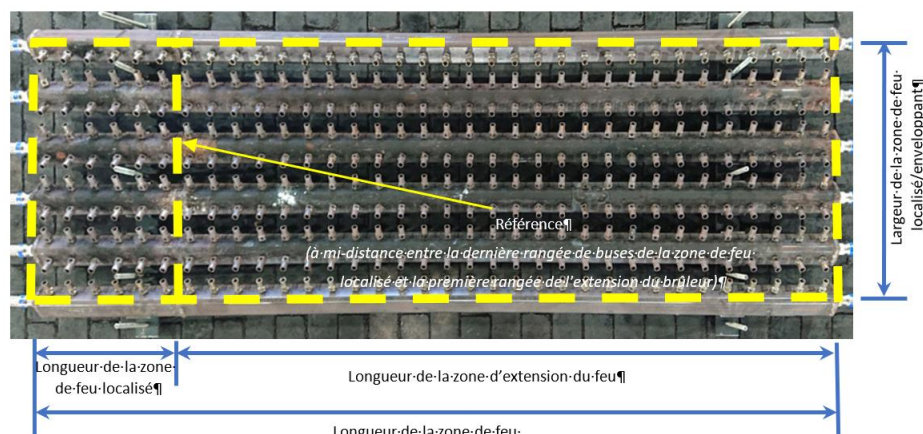
95. Les prescriptions concernant les dimensions hors tout des zones du brûleur sont indiquées au paragraphe 6.2.5.3.2. La largeur (W) des zones de feu localisé et de feu enveloppant est fixée à 500 ± 50 mm, quels que soient le diamètre et la largeur du réservoir. La longueur de la zone de feu localisé (L_{LOC}) est de 250 ± 50 mm pour tous les essais de comportement au feu. Bien que la longueur de la zone d'extension du feu (L_{EXT}), qui permet de simuler la propagation de l'incendie de la zone de feu localisée à la zone de feu enveloppant, soit par définition égale à $1\,400 \pm 50$ mm au maximum, il est possible d'utiliser un brûleur plus court à condition que sa longueur soit supérieure à celle du réservoir utilisé pour l'essai préalable et à celle du système de stockage d'hydrogène comprimé soumis à l'essai lorsqu'ils sont positionnés pour l'essai de comportement au feu du système de stockage d'hydrogène comprimé. La zone de feu enveloppant étant composée de la zone de feu localisé et de la zone d'extension du feu, la longueur de la zone de feu enveloppant (L_{ENG}) est égale à la somme de L_{LOC} et L_{EXT} .

96. Les dimensions précises des zones de feu dépendent du nombre de buses du brûleur, de l'espacement des buses sur la longueur et de l'espacement des rampes sur la largeur. Par exemple, la longueur de la zone de feu localisé (L_{LOC}) peut être de 200 mm avec quatre buses, de 250 mm avec cinq buses ou de 300 mm avec six buses pour un espacement des buses (S_N) de 50 mm, soit la valeur nominale indiquée dans le tableau 8 de la partie II. De même, la longueur de la zone d'extension du feu (L_{EXT}) peut varier de 1 350 mm avec 27 buses à 1 450 mm avec 29 buses pour un espacement des buses (S_N) identique à celui de l'exemple précédent.

97. Le brûleur illustré à la figure 17 est configuré comme suit : l'espacement entre les buses est de 50 mm, la longueur de la zone de feu localisé est de 300 mm (six buses), la longueur de la zone d'extension du feu est de 1,4 m (28 buses), ce qui porte la longueur totale de la zone de feu enveloppant à 1,7 m. Note : toutes les longueurs sont dans les limites des tolérances admissibles indiquées au paragraphe 6.2.5.3.2.1.

98. Les limites de la zone de feu localisé et de la zone d'extension du feu sont illustrées à la figure 17. La limite entre la zone de feu localisé et la zone d'extension du feu se trouve à mi-distance entre la dernière rangée de buses de la zone de feu localisé et la première rangée des buses de la zone d'extension du feu. Cette ligne sert de référence, la zone de feu localisé étant située à gauche et la zone d'extension du feu à droite. La largeur (W) des deux zones de brûleurs correspond à la distance entre le centre de la rampe supérieure et le centre de la rampe inférieure.

Figure 17
Définition des limites des zones du brûleur



99. Un réservoir d'essai préalable (tube en acier fermé par des bouchons) comparable à ceux des essais de comportement au feu des véhicules menés par le JARI est utilisé pour effectuer l'essai préalable de vérification du bon fonctionnement des zones du brûleur. Cela est nécessaire pour garantir la solidité technique du processus empirique de cartographie thermique des zones de feu localisé et de feu enveloppant, puis pour comparer les résultats aux critères fondés sur les essais du JARI. Le réservoir utilisé pour l'essai préalable est équipé d'instruments de la même manière que les réservoirs soumis aux essais de comportement au feu des véhicules et est placé au-dessus du brûleur de la même manière que le système de stockage d'hydrogène comprimé devant être soumis à l'essai au feu (voir fig. 18). Après les essais de mise au point initiaux effectués par le JARI, un essai comparatif interlaboratoires a été réalisé. La cartographie thermique a été réalisée en augmentant le débit de combustible sur toute la plage de flux thermique surfacique (HRR/A) prévue pour le brûleur. Les résultats ont ensuite été comparés aux critères du tableau 10 de la partie II et utilisés pour définir les plages de fonctionnement admissibles et le réglage des débits de combustible pour les zones de feu localisé et enveloppant.

Figure 18
Réservoir d'essai préalable installé au-dessus du brûleur pour la cartographie thermique



100. Les résultats de la cartographie thermique de la zone de feu localisé sont présentés dans les figures 19 à 22 ; ils ont été établis à partir des données disponibles des essais comparatifs interlaboratoires. Ces valeurs reposent sur les moyennes mobiles sur 60 secondes des relevés effectués dans le cadre des essais comparatifs interlaboratoires décrits ci-dessus. Les emplacements des différents capteurs de température sont indiqués au paragraphe 6.2.5.4.3. Les résultats des laboratoires d'essai ont montré que la plage de fonctionnement acceptable est comprise entre 200 et 500 kW/m². La valeur suggérée pour le flux thermique a été fixée à 300 kW/m² pour l'essai de feu localisé afin que les conditions

soient difficiles, mais acceptables pour la plupart des laboratoires. Les valeurs typiques du tableau 4 pour la phase de feu localisé correspondent aux moyennes mobiles sur 60 secondes à 300 kW/m² et permettent de vérifier que le fonctionnement du brûleur est conforme aux attentes.

Tableau 4
Valeurs typiques des températures relevées sur le réservoir d'essai préalable et au niveau du brûleur dans le cas d'un feu localisé (à 300 kW/m²)

Paramètres	Valeurs cibles (calculées à partir des moyennes mobiles sur 60 secondes)
T _{BLoc}	450 °C – 750 °C
T _{MFLoc} et T _{MRLoc}	200 °C – 600 °C
T _{ULoc}	80 °C – 265 °C
T _{BLoc25}	600 °C – 900 °C

Figure 19
Températures relevées sur la surface inférieure du réservoir d'essai préalable pendant la cartographie thermique du feu localisé

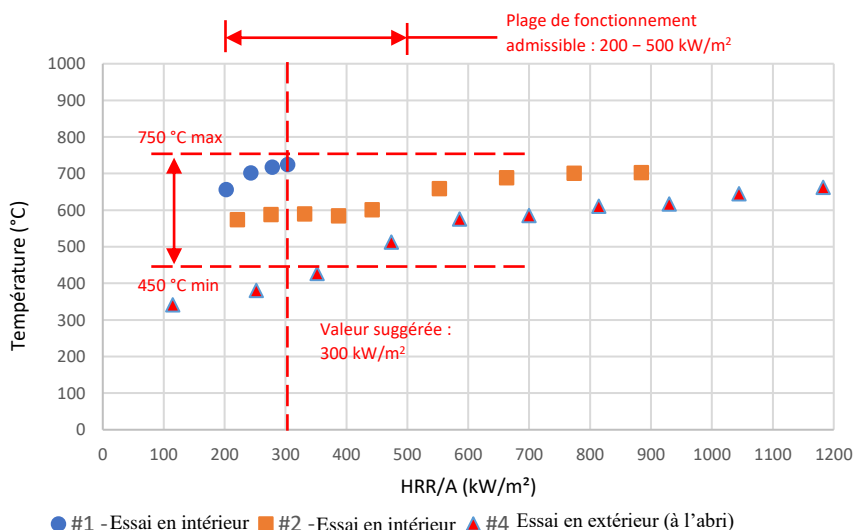


Figure 20a
Températures relevées sur les côtés du réservoir d'essai préalable pendant la cartographie thermique du feu localisé (face avant)

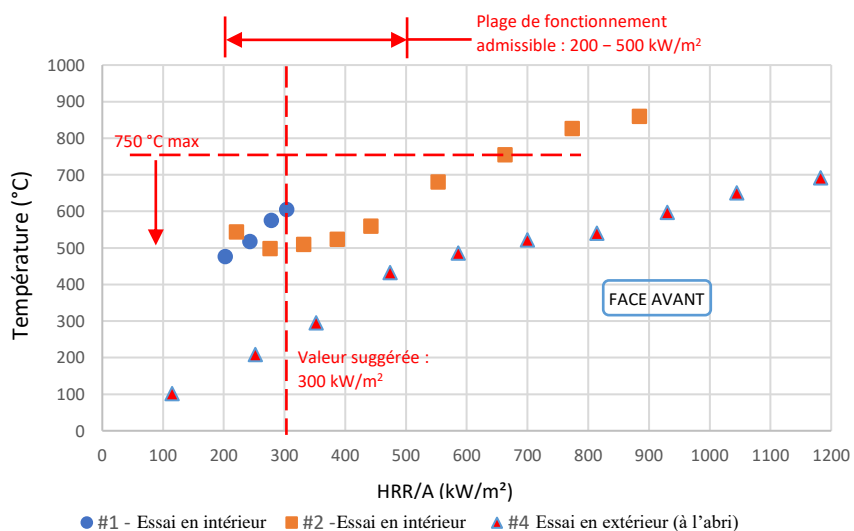


Figure 20 b
Températures relevées sur les côtés du réservoir d’essai préalable pendant la cartographie thermique du feu localisé (face arrière)

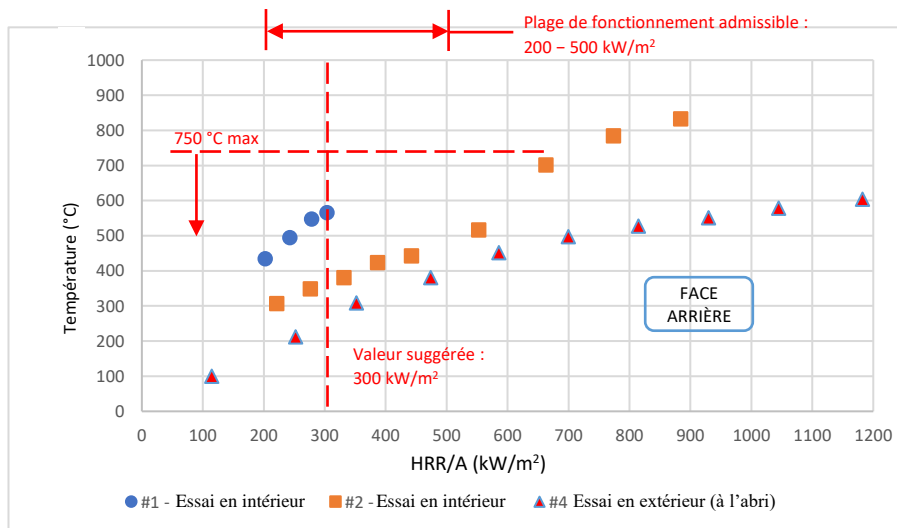


Figure 21
Températures relevées sur la surface supérieure du réservoir d’essai préalable pendant la cartographie thermique du feu localisé

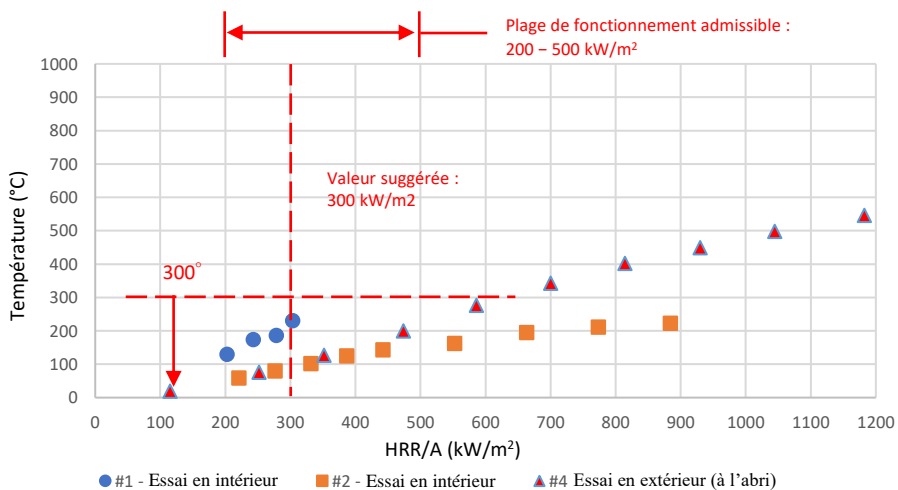
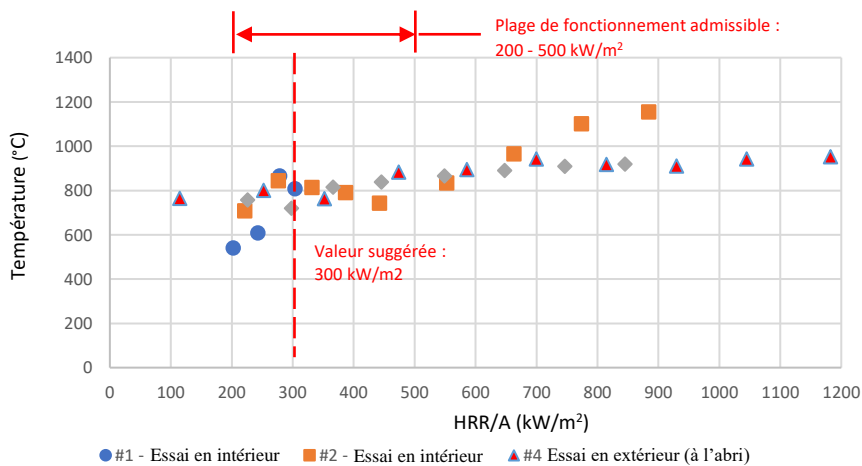


Figure 22
Températures relevées au niveau du brûleur pendant la cartographie thermique du feu localisé



101. Les résultats de la cartographie thermique du feu enveloppant sont présentés aux figures 23 à 26. Comme dans le cas de la cartographie thermique du feu localisé, les valeurs reposent sur les moyennes mobiles sur 60 secondes des relevés effectués dans le cadre des essais comparatifs interlaboratoires, et les emplacements des différents capteurs de température sont indiqués au paragraphe 6.2.5.4.3. Les résultats des laboratoires d'essai ont montré que la plage de fonctionnement acceptable est comprise entre 400 et 1 000 kW/m². La valeur suggérée pour le flux thermique a été fixée à 700 kW/m² pour l'essai de feu localisé afin que les conditions soient difficiles, mais acceptables pour la plupart des laboratoires.

Tableau 5

Valeurs typiques des températures relevées sur le réservoir d'essai préalable et au niveau du brûleur dans le cas d'un feu enveloppant (à 700 kW/m²)

<i>Paramètres</i>	<i>Valeurs cibles</i> <i>(calculées à partir des moyennes mobiles sur 60 secondes)</i>
T _{BENG}	600 °C – 950 °C
T _{M_FENG} et T _{M_RENG} (valeurs moyennes)	600 °C – 950 °C
T _{U_{ENG}}	400 °C – 850 °C
T _{BENG25}	800 °C – 1 050 °C

Figure 23
Températures relevées au centre de la surface inférieure du réservoir d’essai préalable pendant la cartographie thermique du feu enveloppant

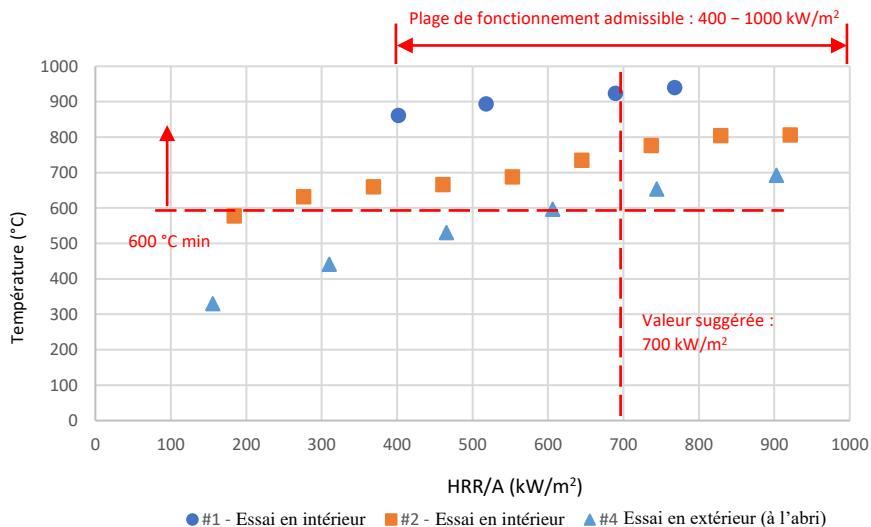


Figure 24
Températures relevées sur les côtés du réservoir d’essai préalable pendant la cartographie thermique du feu enveloppant

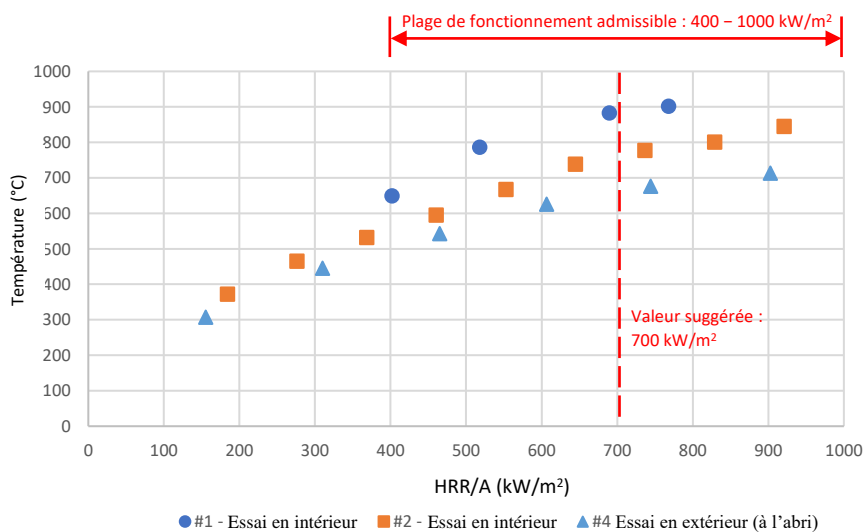


Figure 25
Températures relevées sur la surface supérieure du réservoir d'essai préalable pendant la cartographie thermique du feu enveloppant

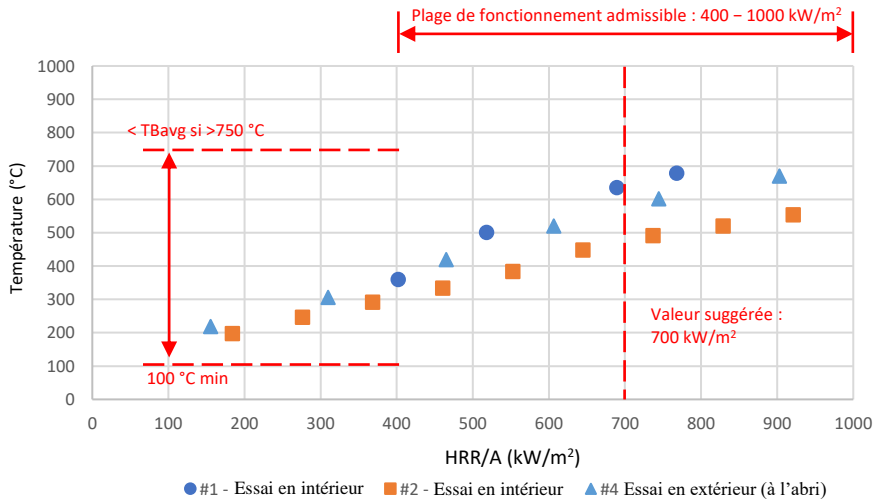
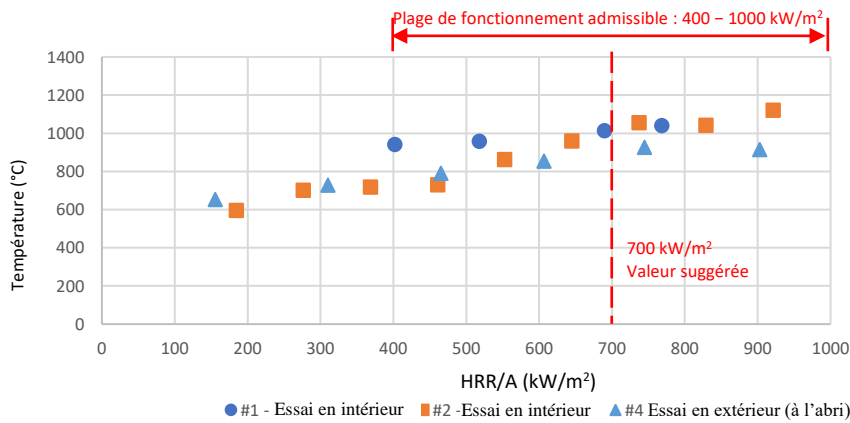


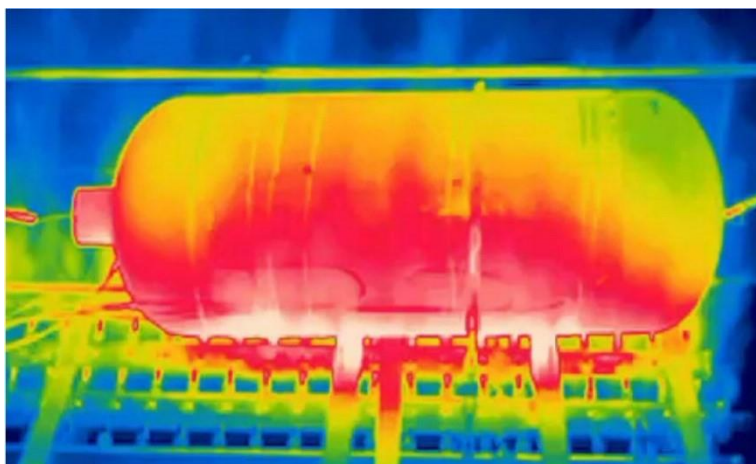
Figure 26
Températures relevées au niveau du brûleur pendant la cartographie thermique du feu enveloppant



102. Le réservoir a également fait l'objet d'une surveillance par imagerie thermique pendant les essais de comportement au feu pour s'assurer que le brûleur prescrit permettait de créer des conditions thermiques uniformes sur la zone d'exposition au feu (voir la figure 27).

Figure 27

Exemple d'image thermique du réservoir pendant l'essai au feu effectué avec le brûleur prescrit



103. Selon que l'essai est effectué à l'intérieur ou à l'extérieur, et selon les conditions météorologiques locales dans ce dernier cas, une protection contre le vent peut être nécessaire afin de créer les conditions thermiques prévues. Pour garantir que les pare-vent ne perturbent pas le tirage du feu pendant les essais et n'influent pas sur les résultats, les pare-vent définis au paragraphe 6.2.5.2 doivent être installés pour l'essai de vérification préalable du brûleur et du montage d'essai, ainsi que pour l'essai de comportement au feu du système de stockage d'hydrogène comprimé proprement dit.

104. Avant de procéder à l'essai de comportement au feu du système de stockage d'hydrogène comprimé, il convient de procéder à un essai de vérification préalable afin de s'assurer que le brûleur et l'appareillage d'essai fonctionnent correctement. Comme dans le cas de la cartographie thermique, il est nécessaire d'utiliser un réservoir d'essai en acier pour garantir la solidité technique de l'approche empirique consistant à comparer les résultats de l'essai de vérification aux critères du tableau 10 de la partie II et à vérifier leur cohérence avec les résultats des essais du brûleur, tels que présentés aux figures 19 à 26. En outre, l'utilisation d'un réservoir d'essai préalable pour la vérification permet d'éviter une éventuelle dégradation des matériaux du réservoir, qui pourrait affecter les résultats. Si les résultats de la vérification sont satisfaisants, le réservoir d'essai préalable est déposé et remplacé par le système de stockage d'hydrogène comprimé qui doit être soumis à l'essai au feu. Il convient de réitérer cette vérification préalable à la fréquence requise en fonction de l'évaluation des risques effectuée par le laboratoire d'essai et des procédures qu'il a mises en place, ainsi que des prescriptions particulières de la Partie contractante compétente.

105. L'essai de comportement au feu du système de stockage d'hydrogène comprimé doit être effectué uniquement avec de l'hydrogène gazeux, de manière à ce que toute fuite potentielle créant un jet de flamme de plus de 0,5 m de long puisse être détectée et mesurée. L'essai ne doit en aucun cas être effectué avec de l'air comprimé, car la pression partielle élevée d'oxygène dans l'air comprimé peut entraîner une situation dangereuse lorsque l'air sous haute pression est combiné à des traces d'huile et d'autres contaminants.

106. Avant l'essai au feu, le système de stockage d'hydrogène comprimé doit être rempli à un taux de charge de 100 %, mais pas à 100 % de la PSN, car la pression varie en fonction de la température, contrairement au taux de charge.

107. L'essai de feu localisé/enveloppant en deux phases défini au paragraphe 6.2.5 était basé sur des travaux préliminaires menés par Transport Canada et la National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) des États-Unis d'Amérique et était initialement prévu pour des systèmes de stockage d'hydrogène comprimé génériques (non spécifiques à un véhicule) où seuls les dispositifs de protection (tels que les écrans et barrières thermiques) et d'autres pièces non soumises à la pression qui sont fixés de manière permanente aux réservoirs sont évalués. Au début, presque tous les essais visaient à vérifier que les systèmes de stockage d'hydrogène comprimé génériques étaient compatibles avec tous les véhicules.

Cependant, afin de prendre en compte les configurations avancées et les dispositifs de sécurité spécifiques au véhicule de manière à capturer avec précision les caractéristiques du feu de véhicule, l'essai de comportement au feu des systèmes de stockage d'hydrogène comprimé a été élargi pour permettre la qualification de systèmes de stockage spécifiques à certains véhicules en plus des systèmes de stockage génériques. Lorsque le constructeur du véhicule décide d'inclure dans l'essai des dispositifs de sécurité spécifiques à un véhicule, la position du système de stockage retenue pour l'exposition au feu correspond à sa position dans ce véhicule, et le système de stockage d'hydrogène comprimé n'est pas placé dans la position la plus défavorable, comme c'est le cas pour la qualification générique.

108. L'essai de feu localisé/enveloppant en deux phases décrit au paragraphe 6.2.5 commence par une phase de feu localisé. La transition vers la phase de feu enveloppant commence au bout de 10 minutes. Bien que l'incendie puisse en réalité se propager dans toutes les directions, l'essai au feu se concentre sur la zone la plus pertinente d'un point de vue technique, c'est-à-dire la zone comprise entre la partie du système de stockage d'hydrogène comprimé soumise à des contraintes thermiques pendant les phases de feu localisé et enveloppant et le TPRD le plus proche, qui est censé détecter l'incendie et purger le réservoir avant que celui-ci n'éclate. Cela permet d'utiliser un brûleur unique et normalisé pour l'essai de qualification de toute la gamme de systèmes de stockage d'hydrogène comprimé visée par le présent Règlement. Les situations susceptibles de se produire pendant les essais au feu sont illustrées aux figures 28 à 35. Dans les cas où les dimensions (largeur ou diamètre) du système de stockage d'hydrogène comprimé sont supérieures à la largeur du brûleur, ce dernier doit être placé en diagonale afin que l'essai évalue la propagation du feu dans la direction pertinente sur le plan technique, c'est-à-dire de la zone de feu localisé vers le TPRD le plus proche.

109. La longueur maximale de la zone d'extension de feu est de 1,4 m, ce qui fait passer la zone de feu de 250 mm pendant la phase de feu localisé à 1,65 m au maximum pendant la phase de feu enveloppant. La longueur maximale de la zone de feu enveloppant repose sur les réglementations existantes et l'expérience acquise au Canada et aux États-Unis d'Amérique ; cette longueur et la durée de la transition entre les deux phases sont étayées par les données des essais de comportement au feu des véhicules menés par le JARI.

110. On trouvera ci-après des exemples de situations couramment rencontrées, dans lesquels les prescriptions ci-dessus ont été prises en compte pour positionner la zone de feu localisé et la zone de feu enveloppant par rapport au système de stockage d'hydrogène comprimé :

- a) Les figures 28 à 30 portent sur des réservoirs protégés par un seul TPRD.

La figure 28 concerne, par exemple, un réservoir cylindrique. La zone de feu localisé est positionnée sous l'extrémité du réservoir située à l'opposé du TPRD afin que la distance au TPRD soit maximale (le bord externe de la zone de feu localisée étant aligné avec l'extrémité sphérique du réservoir). La zone d'extension du feu court vers la gauche (vers le TPRD) sur la longueur maximale admissible, à savoir $1\,400 \pm 50$ mm. Dans le cas 1, la distance entre le bord interne de la zone de feu localisé et le TPRD est inférieure à la longueur maximale admissible de la zone d'extension du feu, de sorte que la zone de feu s'étend au-delà du réservoir. Inversement, dans le cas 3, la distance entre le bord interne de la zone de feu localisé et le TPRD est supérieure à la longueur maximale admissible de la zone d'extension du feu, ce qui veut dire que la zone de feu enveloppant ne s'étend pas jusqu'au TPRD.

Les exemples de la figure 28 illustrent un montage d'essai dans lequel le TPRD est placé sur l'axe longitudinal du réservoir, qui correspond à celui de la zone d'extension du feu, comme illustré au cas 1 de la figure 29. Toutefois, si le constructeur du véhicule décide d'inclure dans l'essai des dispositifs de sécurité spécifiques au véhicule (tels que définis au paragraphe 6.2.5.1.) où le TPRD le plus proche de la zone de feu localisé est situé sur le côté (et non sur l'axe) du réservoir et où le diamètre de celui-ci est supérieur à la largeur du brûleur, alors, comme illustré dans le cas 2 de la figure 29, le brûleur est

positionné de manière à ce que la zone d'extension du feu soit orientée vers le TPRD (le plus proche).

Figure 28
Position des zones de feu localisé et enveloppant lorsque le TPRD se trouve à une extrémité du réservoir d'essai

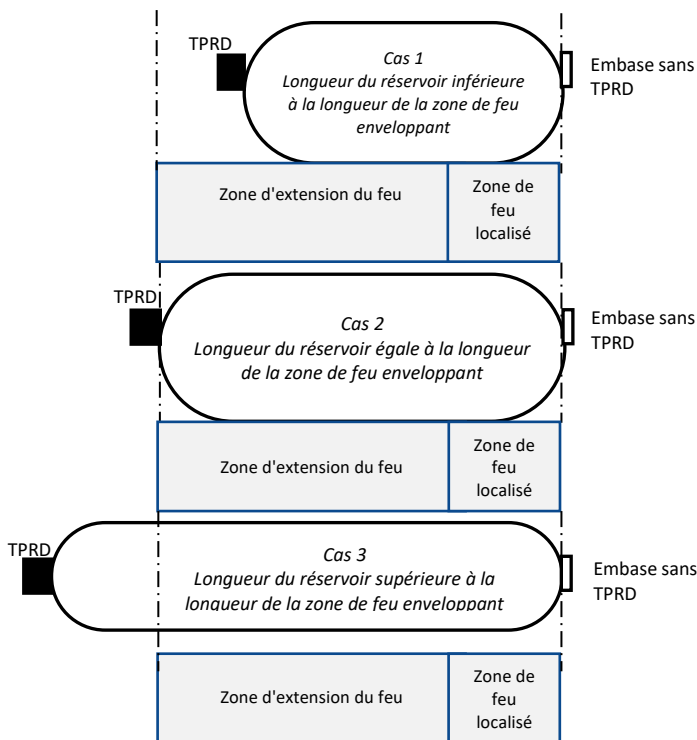
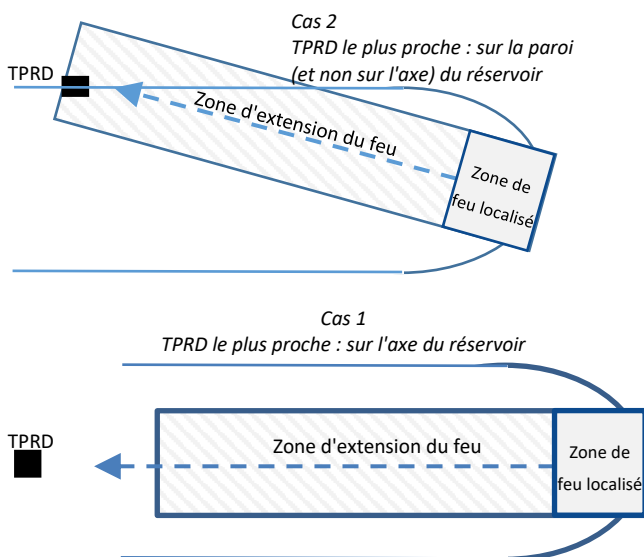


Figure 29
Vue de dessus : zone d'extension du feu orientée vers le TPRD le plus proche

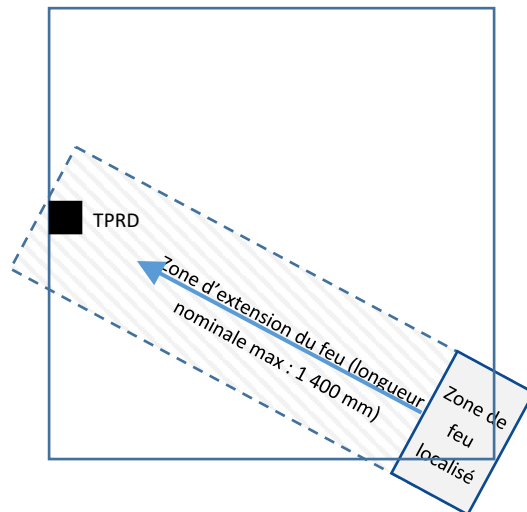


La figure 30 concerne un réservoir présentant une surface plane projetée importante dont les dimensions (largeur ou diamètre) sont supérieures à la largeur du brûleur. On peut par exemple rencontrer ce type de configuration avec des réservoirs modulaires lorsque le constructeur du véhicule a choisi d'inclure dans l'essai des dispositifs de sécurité spécifiques au véhicule (tels que définis au paragraphe 6.2.5.1) utilisés pour installer le système de stockage d'hydrogène comprimé sous le plancher du véhicule et que le système de stockage est orienté de manière à étudier l'exposition de la surface inférieure du réservoir à un feu en nappe. Dans ce cas, on positionne la zone de feu

localisé au niveau du coin de la surface plane opposé au TPRD afin que la distance au TPRD soit maximale (le bord externe de la zone de feu localisé étant alignée avec le coin). On fait ensuite pivoter le brûleur afin que l'axe de la zone d'extension du feu coïncide avec la droite reliant le TPRD au coin de la surface plane. La zone de feu enveloppant peut s'étendre au-delà du TPRD si la distance entre le bord interne de la zone de feu localisé et le TPRD est inférieure à la longueur maximale admissible de la zone d'extension du feu, à savoir $1\,400 \pm 50$ mm.

Figure 30

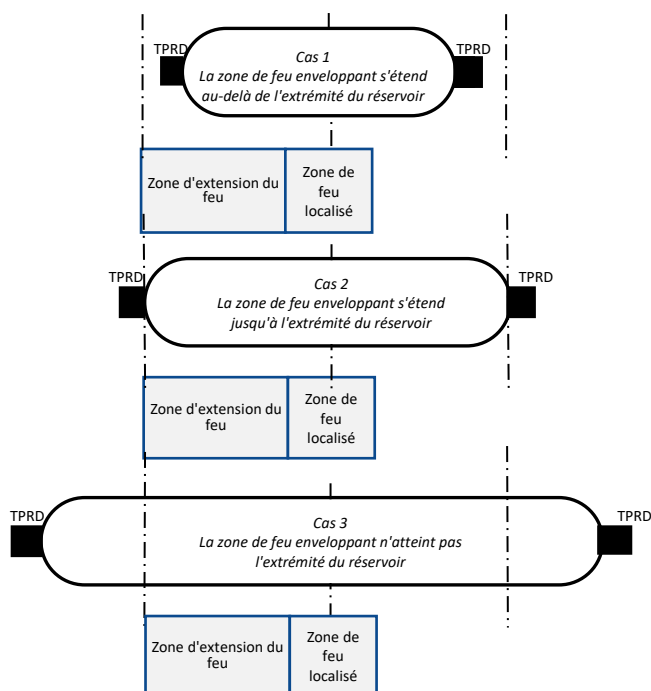
Vue de dessous : position des zones de feu localisé et enveloppant lorsqu'une extrémité d'un réservoir modulaire est équipée d'un TPRD



- b) Les figures 31 et 32 portent sur des réservoirs protégés par deux TPRD (ou points de détection).

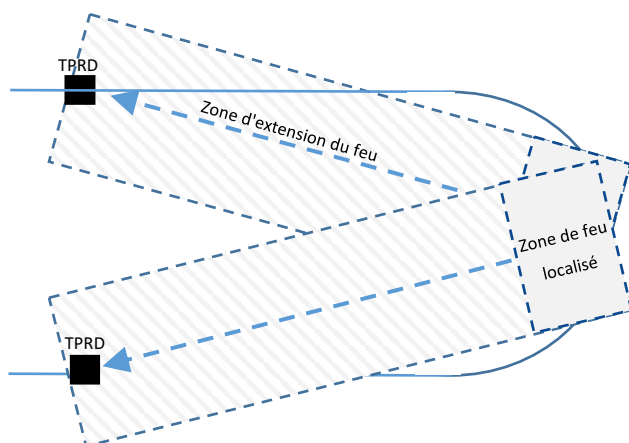
La figure 31 concerne un réservoir cylindrique typique qui est protégé par deux TPRD situés chacun à une extrémité (au lieu d'un seul TPRD, comme à la figure 28). Dans ce cas, la zone de feu localisé est située au milieu de la section cylindrique afin que la distance aux deux TPRD soit maximale. La zone d'extension du feu court le long de l'axe du réservoir sur la longueur maximale admissible ($1\,400 \pm 50$ mm) vers l'un ou l'autre des TPRD (configuration symétrique). Dans le cas 1, la distance entre le TPRD et le bord interne de la zone de feu localisé est inférieure à la longueur maximale admissible de la zone d'extension du feu, de sorte que la zone de feu enveloppant s'étend au-delà du réservoir. Cela se produit lorsque la longueur du réservoir est inférieure à $1,4\text{ m} + 0,25\text{ m} + 1,4\text{ m} = 3,05\text{ m}$. Par contre, dans le cas 3, la distance entre le bord interne de la zone de feu localisé et le TPRD est supérieure à la longueur maximale admissible de la zone d'extension du feu, ce qui veut dire que la zone de feu enveloppant ne s'étend pas jusqu'au TPRD. Cela se produit lorsque la longueur du réservoir est supérieure à $3,05\text{ m}$. Le cas 2 illustre une situation où la zone de feu enveloppant s'étend exactement jusqu'à l'extrémité du réservoir. Cela se produit lorsque la longueur nominale du réservoir est de $3,05\text{ m}$.

Figure 31
Position des zones de feu localisé et enveloppant lorsque les deux extrémités du réservoir sont équipées d'un TPRD



Comme dans le cas 2 de la figure 29, la figure 32 porte sur un réservoir dont les dimensions (largeur ou diamètre) sont supérieures à la largeur du brûleur, les TPRD étant situés de part et d'autre sur les parois. Cela se produit soit parce qu'on a fait pivoter le réservoir pour le placer dans la position la plus défavorable, soit parce que le constructeur du véhicule a décidé d'inclure dans l'essai des dispositifs de sécurité spécifiques au véhicule. La zone de feu localisée étant à égale distance des deux TPRD (configuration symétrique), le résultat sera le même que l'axe du brûleur soit orienté vers l'un ou l'autre des TPRD.

Figure 32
Position des zones de feu localisé et enveloppant lorsque le réservoir est équipé de deux TPRD situés de part et d'autre sur les parois de celui-ci

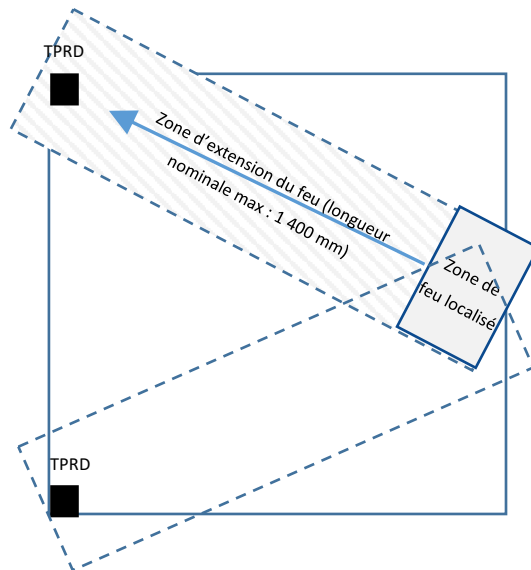


Comme la figure 30, la figure 33 porte sur un réservoir présentant une surface plane projetée importante dont les dimensions (largeur ou diamètre) sont supérieures à la largeur du brûleur. Ce réservoir est équipé de deux TPRD installés sur deux coins adjacents. Dans ce cas, la zone de feu localisé est située au milieu du côté opposé, et la zone d'extension du feu court vers l'un ou l'autre des TPRD (configuration symétrique) sur la longueur maximale admissible de $1\,400 \pm 50$ mm. Si la distance entre le TPRD et le bord interne

de la zone de feu localisé est inférieure à la longueur maximale admissible de la zone d'extension du feu, la zone de feu enveloppant s'étend au-delà du réservoir. Par contre, si la distance entre le bord interne de la zone de feu localisé et le TPRD est supérieure à la longueur maximale admissible de la zone d'extension du feu, la zone de feu enveloppant ne s'étend pas jusqu'au TPRD.

Figure 33

Vue de dessous : position des zones de feu localisé et enveloppant lorsque deux coins adjacents d'un réservoir modulaire sont équipés d'un TPRD

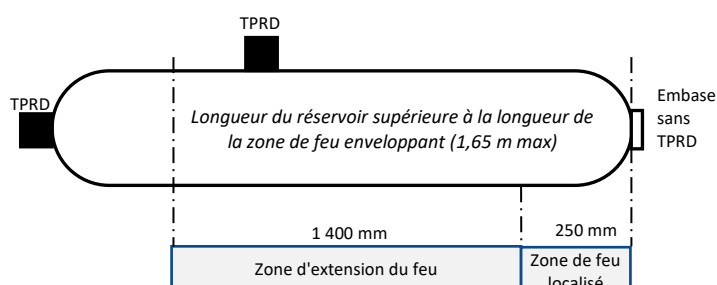


- c) Si le réservoir du système de stockage d'hydrogène comprimé est équipé de TPRD ou de points de détection supplémentaires (ou situés à des emplacements différents) par rapport aux points a) et b) ci-dessus, alors la zone de feu localisé est située de manière à ce que la distance à chaque TPRD soit maximale, et la zone d'extension du feu court vers le TPRD le plus proche sur la longueur maximale admissible définie plus haut.

Le processus est illustré à la figure 34 pour un réservoir équipé d'un TPRD à l'extrémité gauche et d'un second TPRD le long de la paroi. La zone de feu localisé est positionnée sous l'extrémité droite du réservoir afin que la distance au TPRD le plus proche soit maximale (le bord externe de la zone de feu localisée étant aligné avec l'extrémité sphérique du réservoir). La zone d'extension du feu court vers la gauche (vers les TPRD) sur la longueur maximale admissible, à savoir $1\,400 \pm 50$ mm. En outre, comme indiqué au point a) ci-dessus et illustré au cas 2 de la figure 29, le brûleur est positionné de manière à ce que la zone d'extension du feu soit orientée vers le TPRD le plus proche si les dimensions (largeur ou diamètre) du réservoir sont supérieures à la largeur du brûleur.

Figure 34

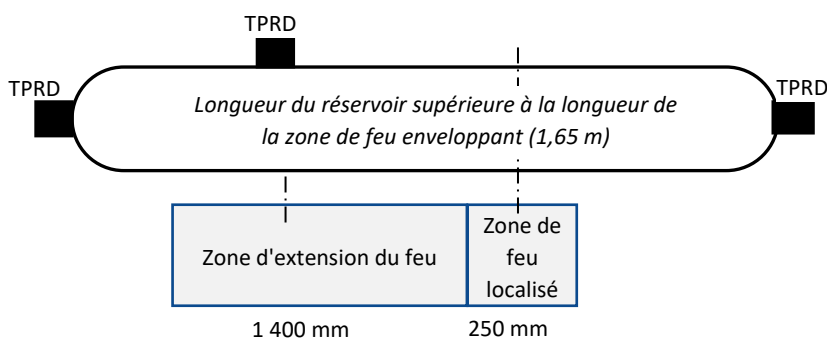
Position de la zone de feu enveloppant lorsque la zone de feu localisé est située à l'extrémité du réservoir



Une autre illustration du processus est présentée à la figure 35 pour un réservoir protégé par trois TPRD. Dans ce cas, la zone de feu localisé est située à l'extrémité droite du réservoir afin que la distance au TPRD le plus proche soit maximale (le bord externe de la zone de feu localisée étant aligné avec l'extrémité sphérique du réservoir), et la zone d'extension du feu court vers la gauche (vers les TPRD) sur la longueur maximale admissible de $1\,400 \pm 50$ mm. En outre, comme le TPRD le plus proche n'est pas situé sur l'axe longitudinal du réservoir, le brûleur est positionné de manière à ce que la zone d'extension du feu soit orientée vers le TPRD (plus proche), qui est situé sur la paroi du réservoir, lorsque le diamètre du réservoir est supérieur à la largeur du brûleur. Voir le point a) ci-dessus et le cas 2 de la figure 29.

Figure 35

Position de la zone de feu enveloppant lorsque la zone de feu localisé est située aussi loin que possible de plusieurs TPRD



111. L'essai est terminé une fois que la purge est déclenchée et que la pression dans le système de stockage d'hydrogène comprimé est retombée à moins de 1 MPa dans un délai maximal d'une heure pour les voitures particulières et utilitaires légers ou de deux heures pour les véhicules utilitaires lourds, sans éclatement du réservoir. Les délais ont été fixés de manière prudente pour tenir compte des feux de batteries et de garages de longue durée, afin de permettre l'évacuation du gaz contenu dans le système de stockage d'hydrogène comprimé lorsque le réservoir est protégé par des revêtements et des écrans thermiques. La valeur de la pression minimale a été définie de manière à ce que le risque de rupture sous contrainte du réservoir soit minimal, et les valeurs de la durée maximale de l'essai sont basées sur les données d'essai des véhicules. Afin de réduire les risques, les jets de flamme résultant de l'évacuation du gaz à travers les parois ou les joints du réservoir sont autorisés seulement s'ils ne dépassent pas 0,5 m. Si l'évacuation du gaz se fait à travers les TPRD, elle doit être continue ; sinon, cela signifie que l'écoulement du gaz dans le TPRD ou les lignes de mise à l'air libre est bloqué par intermittence, ce qui risque de perturber l'évacuation dans certaines situations.

112. Si l'essai au feu du système de stockage d'hydrogène comprimé décrit au 6.2.5.7 n'est pas terminé dans le délai prescrit, on considère que le système de stockage ne satisfait pas aux critères de l'essai. Le gaz contenu dans le système de stockage d'hydrogène comprimé doit être évacué afin d'éliminer le risque de dégagement gazeux haute énergie pendant la manutention après l'essai, et le système de stockage doit être purgé avec un gaz inerte avant que l'air ambiant ne puisse y pénétrer, afin d'éviter la formation d'un mélange inflammable à l'intérieur du système de stockage.

113. Il est préconisé que les informations suivantes soient fournies par le laboratoire d'essai en même temps que le résultat (échec ou réussite) de l'essai de comportement au feu du système de stockage d'hydrogène comprimé, déterminé en fonction des critères énoncés au paragraphe 5.1.4 :

- a) Schémas et photographies montrant la disposition du brûleur, du réservoir et du montage d'essai ;
- b) Débit de combustible et HRR/A pendant l'essai ;

- c) Relevés de température ($T_{B_{LOC25}}$ et $T_{B_{ENG25}}$) à intervalles de 10 secondes et moyennes mobiles sur 60 secondes (qui étayent le résultat de l'essai) ;
- d) Niveau de pression à l'intérieur du réservoir pendant l'essai ;
- e) Température ambiante et vitesse et direction du vent si l'essai se déroule à l'extérieur ;
- f) Chronologie des événements importants ayant conduit à la détermination du résultat.

e) Argumentation concernant les paragraphes 5.1.5 et 6.2.6 : Essais de qualification des dispositifs de fermeture des lignes d'hydrogène des systèmes de stockage

114. La fiabilité et la durabilité des dispositifs de fermeture des lignes d'hydrogène sont capitales pour l'intégrité de l'ensemble du système de stockage. Ces dispositifs de fermeture sont en partie qualifiés par les essais fonctionnels de l'ensemble du système (par. 5.1). Ils sont également qualifiés à titre individuel, ce qui permet de garantir une fiabilité exceptionnelle pour ces éléments mobiles, et de les remplacer par des composants équivalents sans devoir procéder à une requalification de l'ensemble du système de stockage. Les dispositifs de fermeture qui isolent l'hydrogène haute pression du reste du système d'alimentation et de l'environnement sont les suivants :

- a) Le dispositif de décompression thermocommandé (TPRD). Ce dispositif s'ouvre et reste ouvert lorsque le système est exposé au feu ;
- b) Le clapet antiretour. Le clapet antiretour évite le reflux de l'hydrogène dans la ligne de remplissage ;
- c) La vanne d'arrêt. Il s'agit d'une vanne d'arrêt automatique placée entre le réservoir de stockage et le système d'alimentation du véhicule ; elle est par défaut en position fermée en l'absence d'alimentation électrique.

115. Les procédures d'essai pour la qualification des dispositifs de fermeture des lignes d'hydrogène du système de stockage d'hydrogène ont été mises au point par l'Organisation internationale des constructeurs d'automobiles (OICA) comme suite aux discussions des groupes de travail de l'Association canadienne de normalisation (CSA) chargés d'élaborer les normes CSA/ANSI HPRD 1 et CSA/ANSI HGV 3.1 et sur la base des rapports des essais des groupes de travail de la CSA parrainés par le ministère américain de l'énergie (DoE) et exécutés au Laboratoire Powertech pour vérifier les procédures d'essai des dispositifs de fermeture à l'étude au sein de la CSA.

i) Argumentation concernant les prescriptions de qualification du dispositif de décompression thermocommandé

116. Les prescriptions de qualification ont pour objet de vérifier que le dispositif, une fois activé, évacue totalement le contenu du réservoir de combustible, même en fin de vie utile, après avoir été exposé aux variations de température et de pression liés aux cycles de remplissage/vidage et aux facteurs environnementaux. Les prescriptions de l'essai de résistance au feu du système de stockage d'hydrogène permettent de vérifier que le débit de purge est suffisant pour une application donnée (par. 5.1.4).

ii) Argumentation concernant les prescriptions de qualification du clapet antiretour

117. Ces prescriptions ne visent pas à interdire les variantes de conception et de fabrication de composants (composants à fonctions multiples, par exemple) qui ne sont pas expressément prescrites dans le présent Règlement, à condition que ces variantes aient été prises en considération pour l'essai des composants. Lors de l'étude des variantes de conception ou de fabrication, les matériaux et la méthode appliquée doivent être évalués par le laboratoire d'essai afin de garantir que les caractéristiques résultantes et les concepts visant à assurer un niveau de sécurité raisonnable sont équivalents à ceux prescrits dans le présent Règlement. Dans ce cas, le nombre d'échantillons et l'ordre des essais applicables doivent être fixés d'un commun accord par le constructeur et le laboratoire d'essai. Sauf indication contraire, tous les essais doivent être effectués avec de l'hydrogène gazeux conforme aux normes

SAE J2719 (Information report on the development of a hydrogen quality guideline for fuel cell vehicles) ou ISO 14687:2019 (Qualité du carburant hydrogène – Spécification de produit. Le nombre total de cycles doit être de 15 000 (cycles de ravitaillement) pour le clapet antiretour et de 50 000 (cycles de fonctionnement) pour la vanne d'arrêt automatique.

118. Le système de coupure d'une vanne d'arrêt automatique montée sur un réservoir de stockage d'hydrogène comprimé doit être du type à sécurité positive. Le terme « à sécurité positive » s'applique à un dispositif qui passe en mode sécurité ou assure un arrêt complet et sûr quelle que soit la défaillance susceptible de se produire.

119. Les essais électriques de qualification d'une vanne d'arrêt automatique montée sur des réservoirs de stockage d'hydrogène comprimé (par. 6.2.6.2.7) permettent de s'assurer que ce dispositif fonctionne correctement : i) en cas de surchauffe causée par une surtension ; et ii) en cas de défaillance de l'isolation entre le conducteur d'alimentation et le boîtier du composant. L'objectif de l'essai d'exposition à l'hydrogène prérefroidi (par. 6.2.6.2.10) est de vérifier que tous les composants du circuit d'écoulement de l'hydrogène qui sont exposés à de l'hydrogène prérefroidi au cours du remplissage, de l'embout de remplissage au réservoir, peuvent continuer de fonctionner en toute sécurité dans ces conditions.

f) Argumentation concernant le paragraphe 5.1.6 : Étiquetage

120. L'objectif de l'étiquetage des réservoirs de stockage d'hydrogène est triple : i) indiquer la date à laquelle le système devrait être retiré du service ; ii) enregistrer les informations nécessaires pour assurer la traçabilité des conditions de fabrication en cas de défaillance sur route ; et iii) indiquer la valeur de la PSN pour garantir que l'installation est compatible avec le système d'alimentation du véhicule et l'interface de ravitaillement. Les Parties contractantes peuvent définir des prescriptions supplémentaires en matière d'étiquetage. Dans la mesure où le nombre de cycles de pression nécessaires à la qualification au titre du paragraphe 5.1.1.2 peut varier selon la Partie contractante, ce nombre devrait être inscrit sur chaque réservoir.

2. Prescriptions s'appliquant au système d'alimentation du véhicule et impératifs de sécurité

a) Prescriptions concernant la sécurité en utilisation normale

i) Argumentation concernant l'embout de remplissage (par. 5.2.1.1)

121. L'embout de remplissage du véhicule doit être conçu pour que la pression de remplissage soit compatible avec le système de stockage du carburant du véhicule. Des exemples d'embouts de remplissage sont présentés dans les normes ISO 17268, SAE J2600 et SAE J2799. Une étiquette doit être apposée à proximité de l'embout pour informer la personne qui fait le plein, conduit le véhicule ou en est propriétaire du type de carburant (hydrogène liquéfié ou gazeux), de la valeur de la PSN et de la date de retrait du service du système de stockage. Les Parties contractantes peuvent définir des prescriptions supplémentaires en matière d'étiquetage.

ii) Argumentation concernant le paragraphe 5.2.1.2 : Protection du système basse pression contre les surpressions

122. Le système d'alimentation en hydrogène situé en aval d'un détendeur doit être protégé contre les surpressions dues à une défaillance éventuelle de ce dernier.

iii) Argumentation concernant le paragraphe 5.2.1.3 : Système d'évacuation de l'hydrogène

a. Argumentation concernant le paragraphe 5.2.1.3.1 : Dispositifs de décompression

123. La ligne de mise à l'air libre des systèmes d'évacuation de l'hydrogène (dispositifs de décompression et dispositifs de décompression thermocommandés) doit être protégée pour éviter son obstruction par des corps étrangers tels que sable, graviers ou glace. Le gaz ne doit pas être évacué horizontalement (parallèlement à la surface de la route), afin de protéger les premiers intervenants, les autres usagers de la route et les bâtiments adjacents des jets de

flamme potentiellement dangereux. Si le gaz est évacué verticalement, il convient de tenir compte des rejets potentiels dans les tunnels et les parkings souterrains. En outre, dans le cas des bus, il est recommandé de ne pas orienter le TPRD vers une sortie du véhicule afin de ne pas empêcher les passagers de quitter le véhicule en cas de panne ou d'accident.

124. En principe, un système de stockage d'hydrogène comprimé ne devrait pas libérer de gaz haute pression, sauf lorsqu'un TPRD est activé par un feu de véhicule. Les rejets provenant des dispositifs de régulation de la pression peuvent être à haute ou basse pression, mais leur durée est généralement suffisamment courte pour que la longueur des panaches reste faible.

125. Il se peut que les rejets à basse pression ne s'enflamment pas immédiatement au point d'évacuation, et soient par conséquent dilués en deçà de la LII dans de nombreuses situations. L'objectif est donc d'éviter d'exposer des gaz inflammables (concentration > 100 % de la LII) à des sources d'inflammation (telles que des surfaces chaudes dont la température est supérieure à la température d'auto-inflammation, des moteurs générant des arcs électriques ou des étincelles, des interrupteurs électriques, etc.)

b. Argumentation concernant le paragraphe 5.2.1.3.2 : Système d'échappement du véhicule

126. Un essai fonctionnel visant à démontrer que les gaz rejetés par le véhicule sont ininflammables et ne présentent donc aucun danger a été mis au point. Les moyennes mobiles sur 3 s permettent de prendre en compte des concentrations transitoires très brèves non dangereuses pouvant atteindre 8 % sans inflammation. Des essais sur les gaz évacués ont montré que le feu se propage facilement à partir d'une source d'inflammation pour une concentration d'hydrogène supérieure à 10 %, mais qu'il n'y a pas de propagation en dessous de 8 % (Corfu et al., « Development of Safety Criteria for Potentially Flammable Discharges from Hydrogen Fuel Cell Vehicles, SAE Technical Report » 2007-01-437). La limitation à 8 % de la concentration en hydrogène des pics instantanés permet de maîtriser les risques pour les personnes proches du point d'évacuation, même en présence d'une source d'inflammation. L'intervalle utilisé pour le calcul de la moyenne mobile est défini de manière à ce que l'espace entourant le véhicule ne présente aucun danger même lorsque l'hydrogène évacué se diffuse dans l'air ambiant, par exemple dans le cas d'un véhicule tournant au ralenti dans un garage fermé. Pour pouvoir obtenir un accord sur ces conditions de la part des autorités responsables de la construction et des experts de sécurité, il serait judicieux de rappeler que les codes de la construction locaux et nationaux, ainsi que les normes internationalement reconnues comme la norme CEI 60079 de la Commission électrotechnique internationale exigent que dans un espace donné, la concentration en hydrogène soit inférieure à 25 % de la LII (soit 1 %). L'intervalle utilisé pour le calcul de la moyenne mobile a été déterminé en tenant compte d'un débit de rejet d'hydrogène extrêmement élevé, équivalent au débit d'alimentation d'une pile à combustible de 100 kW. On a ensuite calculé le temps nécessaire pour que l'hydrogène ainsi rejeté remplisse l'espace nominal occupé par un véhicule de tourisme (4,6 m x 2,6 m x 2,6 m) et que la concentration atteigne 25 % de la LII. L'intervalle maximal résultant applicable au calcul de la moyenne mobile a été prudemment fixé à 8 s, ce qui démontre que la durée de 3 s utilisée dans le présent document est adéquate et tient compte de la variabilité éventuelle des dimensions du garage et du moteur. Les dispositions des normes ISO en matière d'instrumentation fixent une valeur inférieure d'un facteur de 6 à 10 à la valeur mesurée. En conséquence, dans le cadre de la procédure d'essai exécutée conformément au paragraphe 6.1.4, le calcul de la moyenne mobile sur 3 s nécessite que le temps de réponse du capteur (temps nécessaire pour atteindre 90 % de la valeur mesurée) et le temps d'enregistrement soient inférieurs à 300 ms.

iv) *Argumentation concernant le paragraphe 5.2.1.4 : Protection contre le risque d'incendie en cas de défaillance unique*

127. Des situations dangereuses peuvent se produire si une fuite non intentionnelle d'hydrogène atteint des concentrations inflammables.

- a) Aucune défaillance unique en aval de la vanne d'arrêt principale de l'hydrogène ne doit entraîner la présence d'hydrogène à quelque concentration dans l'air où que ce soit dans l'habitacle ;

- b) La protection contre la présence d'hydrogène dans l'air dans les espaces fermés ou semi-fermés du véhicule contenant des sources d'inflammation non protégées est essentielle :
- i) Sur les véhicules, cet objectif peut être atteint par conception (par exemple, par ventilation des différents espaces pour empêcher l'accumulation d'hydrogène) ;
 - ii) Si la méthode employée est la détection de concentrations d'hydrogène dans l'air égales ou supérieures à $2 \pm 1,0$ %, le conducteur doit être averti par un signal d'alarme. Si la concentration d'hydrogène dépasse $3 \pm 1,0$ % en volume dans l'air des espaces fermés ou semi-fermés du véhicule, la vanne d'arrêt principale de l'hydrogène doit se fermer pour isoler le système de stockage.
- c) Les seuils de déclenchement ont été modifiés au paragraphe 5.2.1.4.3 (Protection contre le risque d'incendie en cas de défaillance unique) afin d'éviter tout chevauchement. La prescription précédente prévoyait le déclenchement de l'alarme pour une concentration en hydrogène comprise entre 1 et 3 %, et la fermeture de la vanne pour une concentration comprise entre 2 et 4 %, ce qui entraînait un chevauchement sur l'intervalle compris entre 2 et 3 %. La nouvelle formulation (concentration > 3,0 % : signal d'alarme ; concentration > 4,0 % : fermeture de la vanne d'arrêt) supprime le chevauchement et ajoute de la clarté.

v) *Argumentation concernant le paragraphe 5.2.1.5 : Fuite du système d'alimentation en carburant*

128. La ligne de remplissage et le système d'alimentation en hydrogène ne doivent présenter aucune fuite détectable.

vi) *Argumentation concernant le paragraphe 5.2.1.6 : Système d'alarme visuelle*

129. Un système d'alarme visuelle doit avertir le conducteur en cas de fuite entraînant une concentration en hydrogène supérieure à 4 % dans l'habitacle, le compartiment à bagages et les espaces du véhicule contenant des sources d'inflammation non protégées. Le système d'alarme visuelle devrait aussi avertir le conducteur en cas de dysfonctionnement du système de détection d'hydrogène. En outre, le système d'alarme doit être capable de répondre à l'un ou l'autre scénario et d'avertir instantanément le conducteur. Le voyant de coupure du circuit d'hydrogène doit être situé dans l'habitacle devant le conducteur, bien en vue de ce dernier. On ne dispose d'aucune donnée permettant d'affirmer qu'une alarme uniquement visuelle serait moins efficace. En cas de défaillance du système de détection, le voyant d'alarme doit s'allumer en jaune. En cas de fermeture d'urgence de la vanne, le voyant d'alarme doit s'allumer en rouge.

vii) *Limite inférieure d'inflammabilité (LII)*

130. (Information de base pour l'interprétation du paragraphe 3.34) : La limite inférieure d'inflammabilité d'un gaz dans l'air est la concentration minimale à laquelle le mélange gazeux permet la propagation de l'onde de combustion (mélange inflammable). Les organismes nationaux et internationaux de normalisation (tels que la National Fire Protection Association (NFPA) et la CEI) fixent la LII de l'hydrogène dans l'air à 4 % (US Department of Interior, Bureau of Mines Bulletin 503, 1952 ; Houf W. G. et al., « Predicting radiative heat fluxes and flammability envelopes from unintended releases of hydrogen », International Journal of Hydrogen Energy 32, p. 136 à 151, 2007 ; NASA RD-WSTF-0001, 1988). La LII, qui dépend de la température, de la pression, de la direction de propagation du feu et de la présence de gaz de dilution, a été déterminée à l'aide de méthodes d'essai spécifiques pour un mélange inerte homogène (American Society for Testing (ASTM) E681-09(2015)). Par conséquent, la définition de la LII est limitée aux environnements homogènes inertes. En conditions réelles (mélange non inerte), la propagation du feu est fonction de la dynamique des fluides, qui augmente toujours la LII apparente. Si une LII de 4 % est appropriée pour évaluer l'inflammabilité dans l'environnement général des véhicules

ou à l'intérieur de l'habitacle, cette valeur peut être excessivement stricte dans le cas des écoulements gazeux, qui ne peuvent s'enflammer qu'à des concentrations en hydrogène supérieures à 4 %. Le fait qu'une source d'inflammation en un point donné puisse enflammer le panache de gaz qui s'échappe dépend des conditions d'écoulement et du mode d'inflammation. À température ambiante, dans un mélange immobile à 4 % d'hydrogène, la combustion peut seulement se propager vers le haut. Lorsque la concentration en hydrogène atteint 8 à 10 %, la combustion peut aussi se propager vers le bas et horizontalement, et le mélange est facilement inflammable quel que soit l'emplacement de la source d'inflammation. La LII est généralement exprimée en pourcentage (concentration volumique du gaz combustible dans le mélange). Coward, H. F. et al., « Limits of flammability of gases and vapors », Bureau of Mines Bulletin 503, USA, 1952 ; Benz, F. J. et al., « Ignition and thermal hazards of selected aerospace fluids », RD-WSTF-0001, NASA Johnson Space Center White Sands Test Facility, Las Cruces, NM, USA, octobre 1988 ; Houf, W. G. et al., « Predicting radiative heat fluxes and flammability envelopes from unintended releases of hydrogen », International Journal of Hydrogen Energy 32, p. 136 à 151, 2007.

viii) *Caractéristiques recommandées pour la conception d'un système d'alimentation en hydrogène*

131. Étant donné qu'un règlement technique basé sur des critères fonctionnels ne peut pas définir les prescriptions d'essai de tous les scénarios possibles, la présente section vise à établir, à l'intention des fabricants, une liste de points à prendre en considération pour la conception des systèmes d'alimentation en hydrogène, en vue de limiter les fuites d'hydrogène et de garantir la sécurité du produit :

- a) Le système d'alimentation en hydrogène devrait fonctionner de manière sûre et correcte et être conçu de manière à limiter le risque de fuites d'hydrogène (par exemple, en réduisant autant que possible le nombre de raccords sur la ligne) ;
- b) Le système d'alimentation en hydrogène devrait supporter les contraintes chimiques, électriques, mécaniques et thermiques liées aux conditions de fonctionnement normal du véhicule ;
- c) Les matériaux utilisés devraient être compatibles avec l'hydrogène gazeux ou liquide selon le cas ;
- d) Le système d'alimentation en hydrogène devrait être installé de manière à être protégé contre les détériorations en conditions normales d'utilisation ;
- e) Les lignes de carburant rigides devraient être maintenues en place de manière à ne pas être soumises à des vibrations critiques ou à d'autres contraintes ;
- f) Le système d'alimentation en hydrogène devrait être protégé contre un débit excessif en cas de défaillance en aval ;
- g) Aucun organe du système d'alimentation en hydrogène, y compris les éléments de protection qui en font partie, ne devrait faire saillie au-delà du contour extérieur du véhicule ou de la structure de protection.

b) Prescriptions concernant la sécurité après un choc

i) *Argumentation concernant le paragraphe 5.2.2.1 : débit de fuite admissible après un choc*

132. Les débits de fuite admissibles après un choc énoncés dans la norme américaine FMVSS 301 et dans les Règlements ONU n^{os} 94 et 95 pour la période de 60 min suivant le choc sont identiques à 6 % près. De ce fait, la valeur de 30 g/min figurant dans le Règlement ONU n^o 94 a été retenue comme base pour les calculs visant à définir le débit de fuite d'hydrogène admissible après un choc dans le cadre du présent RTM ONU.

133. Le critère de débit de fuite d'hydrogène après un choc est fixé de manière à ce que l'énergie de combustion libérée soit équivalente à la valeur admissible pour les véhicules à essence. Le débit de fuite admissible équivalent pour l'hydrogène (W_H) peut être calculé comme suit pour les véhicules équipés d'un système de stockage d'hydrogène comprimé ou liquéfié à partir du débit de fuite d'essence (W_G) et des pouvoirs calorifiques inférieurs (PCI) figurant dans le manuel Transportation Energy Data Book du DoE (120 MJ/kg pour l'hydrogène et 42,7 MJ/kg pour l'essence) :

$$W_H = W_G \times \text{PCI}_H / \text{PCI}_G = 30 \times 42,7 / 120 = 10,7 \text{ g/min}$$

La perte totale admissible d'hydrogène est par conséquent égale à 642 g pour la période de 60 min suivant le choc.

134. Le débit de fuite d'hydrogène admissible (V_H) peut également être exprimé comme suit à température et pression normales pour les véhicules équipés d'un système de stockage d'hydrogène comprimé ou liquéfié :

$$V_H = \frac{10,7 \text{ g/min}}{2(1,00794) \text{ g/mol}} * 22,41 \frac{\text{Nl}}{\text{mol}} = 118 \text{ Nl/min}$$

135. Afin de vérifier la valeur du débit de fuite d'hydrogène, le JARI a effectué des essais d'inflammation de fuites d'hydrogène sous un véhicule et à l'intérieur du compartiment moteur pour des débits compris entre 131 Nl/min et 1 000 Nl/min. Les résultats ont montré que, bien que l'inflammation de l'hydrogène soit susceptible de provoquer une explosion assez bruyante, le niveau de pression sonore et le flux thermique étaient insuffisants (même pour un débit de fuite de 1 000 Nl/min) pour endommager la zone située sous le plancher du véhicule, provoquer l'ouverture du capot ou blesser une personne se tenant à un mètre du véhicule (SAE Technical Paper 2007-01-0428, Diffusion and Ignition Behavior on the Assumption of Hydrogen Leakage from a Hydrogen-Fuelled Vehicle).

ii) *Argumentation concernant le paragraphe 5.2.2.2 : Limite de concentration dans les espaces clos après un choc*

136. L'objet de cette prescription d'essai est de garantir que l'hydrogène ne puisse pas s'accumuler dans l'habitacle, le compartiment à bagages ou le compartiment à marchandises de manière à présenter un risque après un choc. La limite de concentration en hydrogène a été fixée de manière prudente à 4 %, car il s'agit de la concentration la plus faible à laquelle l'hydrogène peut s'enflammer, la combustion correspondante dégageant par ailleurs très peu d'énergie. Étant donné que l'essai est mené en parallèle avec l'essai d'étanchéité après choc et dure au moins 60 min, il n'est pas nécessaire de prévoir une marge pour tenir compte des zones de dilution, car le délai est suffisant pour que l'hydrogène puisse se diffuser dans tout le compartiment.

iii) *Argumentation concernant le paragraphe 5.2.2.3 : Déplacement du réservoir*

137. L'un des règlements de sécurité en cas de choc s'appliquant aux véhicules équipés d'un système de stockage de gaz comprimé est la norme canadienne CMVSS 301, qui inclut des prescriptions relatives à l'installation du réservoir de carburant en vue de prévenir son déplacement.

F. Argumentation concernant les procédures d'essai du système de stockage et du système d'alimentation en carburant

138. Les procédures d'essai de la section 6 reproduisent les conditions d'utilisation sur route aux fins de l'application des prescriptions fonctionnelles énoncées à la section 5. La plupart des procédures d'essai sont inspirées des procédures d'essai définies dans les règlements nationaux antérieurs ou dans les normes du secteur.

1. Argumentation concernant les essais d'intégrité du système de stockage et du système d'alimentation en carburant

a) Argumentation concernant le paragraphe 6.1.1 : Essai d'étanchéité du système de stockage d'hydrogène comprimé après choc

139. L'essai d'étanchéité après choc peut se dérouler selon deux procédures différentes :

6.1.1.1 Procédure d'essai lorsque le gaz d'essai est l'hydrogène

6.1.1.2 Procédure d'essai lorsque le gaz d'essai est l'hélium.

140. La perte de carburant représente la quantité maximale admissible libérée par l'ensemble du système de stockage d'hydrogène comprimé du véhicule. La quantité libérée après un choc peut être déterminée en mesurant la perte de pression dans le système de stockage de gaz comprimé sur une période d'au moins 60 min après le choc, puis en calculant le débit de fuite de l'hydrogène en fonction de la perte de pression mesurée et de la durée de la mesure à l'aide de l'équation d'état du gaz comprimé dans le système de stockage (voir le document SAE Technical Paper 2010-01-0133, « Development of the Methodology for FCV Post-crash fuel leakage testing incorporated into SAE J2578 »). Dans le cas d'un système de stockage comportant plusieurs réservoirs isolés les uns des autres après un choc, il peut être nécessaire de mesurer la perte d'hydrogène pour chaque réservoir (selon l'approche décrite au paragraphe 5.2.2.1), puis de les additionner pour déterminer le débit de fuite total d'hydrogène gazeux du système de stockage.

141. Cette méthode peut aussi être élargie afin de permettre l'utilisation d'un gaz non inflammable pour l'essai de choc. Le gaz choisi est l'hélium, en raison de son faible poids moléculaire, proche de celui de l'hydrogène. Afin de déterminer le ratio entre le débit de fuite de l'hydrogène et celui de l'hélium, on considère que la totalité du gaz s'échappe du réservoir à travers un orifice de section A (on parle d'écoulement réduit), A étant la surface de fuite équivalente après le choc. Dans ce cas, le débit massique W est donné par la formule :

$$W = C \times C_d \times A \times (\rho \times P)^{1/2}$$

où C_d est le coefficient de débit de l'orifice, A la section de l'orifice et ρ et P la densité et la pression du fluide (immobile) en amont, avec

$$\rho = R_u \times T/M$$

et

$$C = \gamma / ((\gamma + 1)/2)^{(\gamma + 1)/(\gamma - 1)}$$

où R_u est la constante des gaz parfaits, T la température, M le poids moléculaire et γ le coefficient de Laplace (C_v/C_p) du gaz qui s'échappe. Dans le cas qui nous intéresse, à savoir la détermination de la relation entre le débit de fuite d'hélium et le débit de fuite d'hydrogène après le choc, C_d , A, R_u , T et P sont constants, ce qui permet d'établir l'équation suivante :

$$W_{H_2}/W_{He} = C_{H_2}/C_{He} \times (M_{H_2}/M_{He})^{1/2}$$

142. Dans des conditions de température et de pression constantes, le débit volumique est égal au débit massique multiplié par le poids moléculaire, ce qui permet d'écrire :

$$V_{H_2}/V_{He} = C_{H_2}/C_{He} \times (M_{He}/M_{H_2})^{1/2}$$

143. L'équation ci-dessus permet d'établir que, pour des surfaces de fuites identiques, le ratio entre le débit volumique de l'hélium et celui de l'hydrogène (et par conséquent le ratio des concentrations volumiques) est d'environ 75 %. Le débit de fuite d'hydrogène après choc peut donc être déterminé par la formule :

$$V_{H_2} = V_{He} \times 0,75$$

où V_{He} est le débit de fuite d'hélium après le choc (Nl/min).

b) *Argumentation concernant le paragraphe 6.1.2 : Procédure d'essai pour la mesure des concentrations de gaz dans les espaces fermés après choc pour les véhicules équipés d'un système de stockage d'hydrogène comprimé*

144. L'essai peut consister à mesurer la concentration en hydrogène ou la baisse correspondante de la concentration en oxygène. Les capteurs doivent être positionnés en des points pertinents dans l'habitacle et les compartiments à bagages et à marchandises. Étant donné que l'essai est mené en parallèle avec l'essai d'étanchéité du système de stockage après choc et dure au moins 60 min, il n'est pas nécessaire de prévoir une marge pour tenir compte des zones de dilution, car le délai est suffisant pour que l'hydrogène puisse se diffuser dans tout le compartiment.

145. Dans le cas où l'essai de choc n'est pas exécuté avec de l'hydrogène et où l'essai d'étanchéité est effectué avec de l'hélium comprimé, il est nécessaire de définir une concentration d'hélium qui soit équivalente à 4 % d'hydrogène en volume. La concentration volumique du gaz (hydrogène ou hélium) dans le compartiment étant proportionnelle à son débit de fuite volumique, il est possible de déterminer la concentration volumique d'hélium admissible X_{He} à l'aide de l'équation élaborée dans les paragraphes 132 à 136 en multipliant la concentration d'hydrogène par 0,75. La concentration volumique équivalente d'hélium se calcule donc comme suit :

$$X_{He} = 4 \% H_2 \times 0,75 = 3 \%$$

La concentration volumique d'hélium admissible est donc de 3 % dans l'habitacle et les compartiments à bagages et à marchandises si l'essai de choc d'un véhicule équipé d'un système de stockage de gaz comprimé est effectué avec de l'hélium comprimé au lieu d'hydrogène comprimé.

146. Des exemples de localisation des points de mesure des concentrations d'hydrogène figurent dans le document intitulé « Examples of hydrogen concentration measurement points for testing » présenté par l'OICA à la troisième réunion du sous-groupe des questions de sécurité et basé sur la norme technique japonaise relative aux véhicules à hydrogène comprimé (Attachment 100 – Technical Standard For Fuel Systems Of Motor Vehicle Fueled By Compressed Hydrogen Gas).

2. Argumentation concernant le paragraphe 6.2 : Procédures d'essai pour les systèmes de stockage d'hydrogène comprimé

147. La plupart des procédures d'essai pour les systèmes de stockage d'hydrogène sont inspirées des procédures d'essai définies dans les règlements nationaux antérieurs ou les normes du secteur. Les principales différences sont les suivantes : les essais sont menés de manière séquentielle (et non plus en parallèle sur des réservoirs différents) et la vitesse de remplissage a été réduite pour l'essai d'éclatement afin de tenir compte des vitesses de remplissage en utilisation réelle. En outre, la durée de maintien de la pression d'épreuve a été portée à 4 minutes. Ces modifications visent à réduire la sensibilité de la mesure de la pression d'éclatement initiale à la vitesse de remplissage et à évaluer la capacité du réservoir à supporter la pression. La question de l'adéquation des prescriptions du présent RTM ONU et de la différence de niveau d'exigence entre celui-ci et les règlements antérieurs de l'Union européenne est traitée dans une évaluation comparative du Laboratoire britannique de recherche sur le transport intitulée « Hydrogen-Powered Vehicles: A Comparison of the European Legislation and the draft ECE global technical regulation » (C. Visvikis, Transport Research Laboratory, CPR1187, 2011).

- a) En raison des différentes vitesses auxquelles un cycle de pression hydraulique peut être effectué, une disposition a été ajoutée pour permettre aux fabricants de réservoirs de définir un profil de cycle de pression adéquat afin d'éviter une défaillance prématurée du réservoir due à des conditions d'essai en dehors des limites de conception, tout en maintenant le niveau d'exigence des essais (par. 6.2.3.2).
- b) La procédure de l'essai de chute a été simplifiée : elle porte sur un seul réservoir, qui tombe une seule fois. Le réservoir doit résister à une chute selon l'une quelconque des orientations de chute indiquées dans la procédure d'essai.

148. Des prescriptions pour les dispositifs de fermeture du système de stockage d'hydrogène (dispositif de décompression thermocommandé (TPRD), vanne d'arrêt automatique et clapet antiretour) ont été élaborées par le CSA et publiées sous les cotes CSA/ANSI HGV 3.1 et CSA/ANSI HPRD 1 :

- a) Les évaluations de la durabilité à 50 000 cycles de pression (par. 6.2.6.2.3) tiennent compte des oscillations de pression auxquelles sont soumis les clapets antiretour au cours du remplissage et des nombreux déclenchements des vannes d'arrêt automatiques entre deux remplissages ;
- b) Les essais de vibration (par. 6.2.6.2.8) portent sur la totalité de la plage de fréquences comprises entre 10 et 40 Hz, car plusieurs laboratoires d'essai des composants ont signalé qu'il pouvait y avoir plus d'une fréquence de résonance. La fréquence de 17 Hz précédemment utilisée dans les essais de vibration des composants a été déterminée pour un véhicule circulant sur différents revêtements routiers, et tient compte de la proximité du moteur. Cependant, on peut s'attendre à ce que la fréquence de résonance change en fonction de la conception du dispositif et de la configuration du montage. En conséquence, il est nécessaire de balayer une plage de fréquence allant jusqu'à 40 Hz ;
- c) Les résultats des essais des dispositifs de fermeture sont enregistrés par le laboratoire d'essai et communiqués au fabricant. Dans l'essai de débit, qui porte sur huit dispositifs de décompression, le débit retenu est la valeur mesurée la plus faible, en NI par minute (0 °C, 1 atm), corrigé pour l'hydrogène ;
- d) L'essai d'exposition aux agents atmosphériques (par. 6.2.6.2.6) s'inspire de deux autres essais, à savoir l'essai de vieillissement à l'oxygène et l'essai de vieillissement à l'ozone. Le premier figure dans la norme CSA/ANSI NGV 3.1 et est conforme aux normes ISO 12619-2 (Véhicules routiers – Composants des circuits d'alimentation pour hydrogène gazeux comprimé (CGH2) et mélanges de gaz naturel et hydrogène – Partie 2 : Performances et méthodes générales d'essai) et ISO 15500-2 (Véhicules routiers – Composants des systèmes de combustible gaz naturel comprimé (GNC) – Partie 2 : Performances et méthodes générales d'essai). Les prescriptions et la procédure du second ont été tirées du RTM ONU n° 110 relatif aux organes pour l'alimentation de moteurs au GNC, et ajoutées aux normes CSA concernant les composants des systèmes d'alimentation en hydrogène et en GNC ;
- e) L'ordre des essais figurant au paragraphe 6.2.6.1.1 a été corrigé et harmonisé avec les prescriptions du paragraphe 5.1.5.1. Plus précisément, l'essai de déclenchement sur banc est effectué avant l'essai de débit. Les prescriptions d'essai ont également été harmonisées avec la norme ISO 19882 (Hydrogène gazeux – Dispositifs limiteurs de pression thermiquement activés pour les conteneurs de carburant de véhicules à hydrogène comprimé). Enfin, un tableau récapitulatif des conditions appliquées dans les essais de cycle de pression a été ajouté pour plus de clarté ;
- f) La température de l'essai de vieillissement accéléré a été définie (par. 6.2.6.1.2). La nouvelle équation comble plusieurs lacunes de l'ancienne. Par exemple, les unités de l'ancienne formule n'étaient pas homogènes, ce qui donnait des résultats différents selon que les températures étaient exprimées en degrés Celsius ou Fahrenheit. La nouvelle équation est le fruit des recherches sur la résistance au fluage des eutectiques et donne des résultats similaires à l'ancienne formule lorsqu'elle est utilisée sur la plage de températures typiquement utilisée auparavant, mais donne des valeurs plus réalistes sur une plage plus large et quelle que soit l'unité ;
- g) L'essai de résistance à la corrosion saline (par. 6.2.6.1.4) a été mis à jour d'après l'essai prévu par la norme CSA/ANSI HPRD 1, plus représentatif de l'environnement routier. L'essai porte sur le TPRD, le clapet antiretour et la vanne d'arrêt ;

- h) L'utilisation d'hydroxyde de sodium et de nitrate d'ammonium pour l'essai en environnement routier (par. 6.2.6.1.5) a été supprimée. L'hydroxyde de sodium réagit chimiquement avec l'aluminium, qui est le principal matériau du corps de nombreux dispositifs de décompression. Il s'agit donc d'un essai très difficile à réaliser si le dispositif de décompression doit être immergé (surtout s'il est effectué après un essai à l'acide sulfurique qui affecte les surfaces anodisées, mais ne provoque pas de dégradation mécanique). L'essai par immersion a été remplacé par un essai par pulvérisation, et l'éthanol et l'essence ont été ajoutés à la liste des agents chimiques, conformément aux prescriptions des normes CSA/ANSI HPRD 1:21 et CSA/ANSI HGV 3.1-2015 relatives aux scénarios d'accident de véhicule, c'est-à-dire à l'exposition à l'essence provenant d'autres voitures. La modification s'applique aux vannes d'arrêt et aux clapets antiretour. L'éthanol (E10) a remplacé le méthanol (M5), car il est plus représentatif des carburants actuellement utilisés sur les routes ;
- i) La nouvelle procédure d'essai de chute des TPRD permet de laisser tomber un TPRD selon les six orientations prévues, ou bien d'utiliser jusqu'à six TPRD (un par chute). Cette possibilité ne vise pas à offrir différents niveaux d'exigence, mais à faciliter la réalisation de l'essai ;
- j) Le nombre de TPRD nécessaires pour l'essai de déclenchement sur banc est passé de deux à trois (par. 6.2.6.1.9) par cohérence avec le nombre nécessaire pour l'essai de débit. En outre, en raison de l'ajout de l'essai de déclenchement à haute pression et de l'essai de débit de trois TPRD, l'essai de pression à 100 % de la PSN portant sur un seul TPRD n'est plus nécessaire ;
- k) L'épreuve d'exposition aux agents atmosphériques des TPRD (par. 6.2.6.1.11) a été ajoutée, car il n'existait aucune disposition concernant l'épreuve d'exposition à l'hydrogène pour les matériaux non métalliques. L'essai est également harmonisé avec le paragraphe 6.2.6.2.6, qui porte sur les clapets antiretour et les vannes d'arrêt ;
- l) La définition du cycle de fonctionnement de l'essai de cycle de pression à des températures extrêmes du clapet antiretour et la vanne d'arrêt (par. 6.2.6.2.3) a été modifiée pour l'harmoniser avec la norme CSA/ANSI HGV 3.1.

G. Argumentation concernant les prescriptions facultatives : Véhicules équipés d'un système de stockage d'hydrogène liquéfié

149. La mise au point et la commercialisation des véhicules fonctionnant à l'hydrogène n'en étant qu'à leurs débuts, ces dernières années ont été marquées par l'étude et l'évaluation de méthodes d'essai pour la qualification des véhicules en vue de leur utilisation sur route. Cependant, les systèmes de stockage d'hydrogène liquéfié ont fait l'objet de bien moins de travaux que les systèmes de stockage de gaz comprimé. Au moment de la rédaction du présent document, un seul constructeur proposait un véhicule équipé d'un système de stockage d'hydrogène liquéfié, et l'expérience de l'utilisation sur route de ces systèmes de stockage était très limitée. Les prescriptions concernant les systèmes de stockage d'hydrogène proposées dans le présent document ont fait l'objet de débats techniques, et bien qu'elles semblent raisonnables, elles n'ont pas été validées. Compte tenu du manque d'expérience dans ce domaine, certaines Parties contractantes ont demandé un délai pour les essais et la validation. En conséquence, les prescriptions s'appliquant aux systèmes de stockage d'hydrogène liquéfié ont été présentées dans la section G en tant que prescriptions facultatives.

1. Informations de base sur les systèmes de stockage d'hydrogène liquéfié

a) L'hydrogène gazeux a une faible densité énergétique par unité de volume

150. Pour remédier à cet inconvénient, les systèmes de stockage d'hydrogène liquéfié maintiennent l'hydrogène à l'état liquide à des températures cryogéniques.

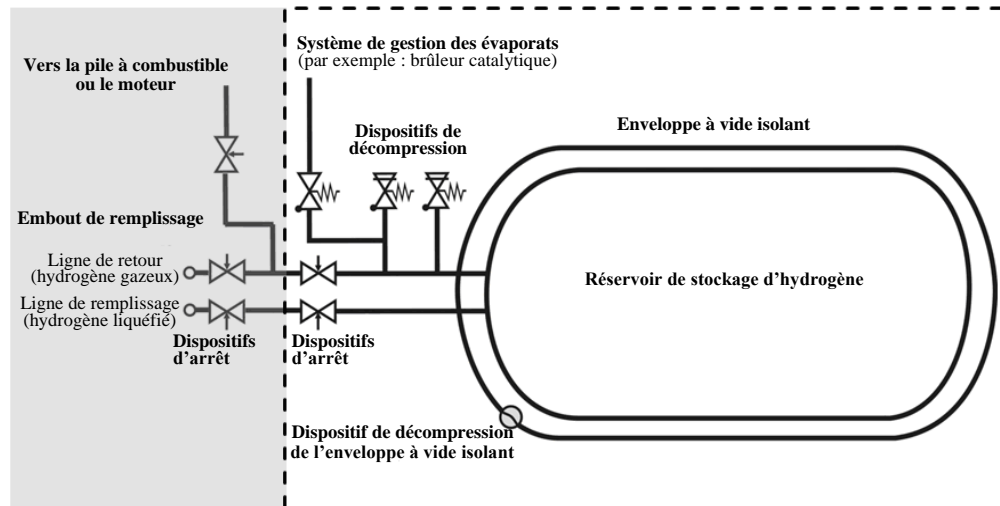
b) Un système typique de stockage d'hydrogène liquéfié est représenté à la figure 36

151. Les systèmes réels peuvent présenter des différences sur le plan du type, du nombre, de la configuration et de la disposition des différents éléments fonctionnels. En définitive, les limites du système de stockage d'hydrogène liquéfié sont définies par les interfaces qui isolent l'hydrogène stocké (liquide ou gazeux) du reste du système d'alimentation en carburant et du milieu ambiant. Tous les composants situés à l'intérieur de ces limites sont soumis aux prescriptions énoncées dans la présente section ; les composants situés en dehors de ces limites sont soumis aux prescriptions générales de la section 4. Ainsi, le système typique illustré à la figure 36 se compose des éléments réglementés suivants :

- a) Réservoir(s) de stockage d'hydrogène liquéfié ;
- b) Dispositif(s) d'arrêt ;
- c) Système de gestion des évaporats ;
- d) Dispositifs de décompression (PRD) ;
- e) Tuyauteries de raccordement (s'il en existe) et raccords entre les composants ci-dessus.

Figure 36

Système typique de stockage d'hydrogène liquéfié



c) Au cours du remplissage, l'hydrogène liquéfié s'écoule du système de ravitaillement vers le ou les réservoirs de stockage

152. L'hydrogène gazeux du système de stockage est renvoyé vers la station de distribution au cours du processus de remplissage, afin que l'hydrogène liquéfié puisse s'écouler vers le réservoir de stockage sans causer de surpression du système. La ligne de remplissage (hydrogène liquéfié) comme la ligne de retour (hydrogène gazeux) sont équipées de deux vannes d'arrêts pour éviter toute fuite en cas de défaillance unique.

d) L'hydrogène liquéfié est stocké en conditions cryogéniques

153. Afin de maintenir l'hydrogène à l'état liquide, le réservoir doit être bien isolé, par exemple à l'aide d'une enveloppe à vide isolant. Il est recommandé de se fonder sur des règles ou normes généralement reconnues (telles que celles mentionnées au paragraphe 7) pour garantir une conception correcte du réservoir de stockage et de l'enveloppe à vide isolant.

e) **Au cours de périodes prolongées de stationnement du véhicule, le transfert de chaleur cause une élévation de la pression dans le ou les réservoirs de stockage d'hydrogène**

154. Un système de gestion des évaporats limite l'élévation de pression induite par le transfert de chaleur dans le ou les réservoirs de stockage d'hydrogène afin que la pression ne dépasse pas la valeur indiquée par le fabricant. L'hydrogène qui est évacué du système de stockage peut être soumis à un traitement avant rejet vers l'extérieur ou consommé dans les systèmes en aval. Les rejets résultants d'une surpression devraient être considérés comme faisant partie du débit de fuite/perméation admissible de l'ensemble du véhicule.

f) **Dysfonctionnement**

155. En cas de dysfonctionnement du système de gestion des évaporats, de perte de vide ou d'incendie extérieur, le ou les réservoirs de stockage d'hydrogène sont protégés contre la surpression par deux dispositifs de décompression indépendants (PRD) et l'enveloppe à vide isolant est protégée par son propre dispositif de décompression.

g) **Lorsque l'hydrogène alimente le système d'entraînement, il s'écoule depuis le système de stockage en passant par la vanne d'arrêt raccordée au système d'alimentation en hydrogène**

156. En cas de détection d'une défaillance dans le système d'entraînement ou dans l'embout de remplissage, les systèmes de sécurité du véhicule prévoient habituellement la fermeture de la vanne d'arrêt du réservoir pour isoler l'hydrogène des systèmes situés en aval et de l'environnement.

2. **Argumentation concernant les prescriptions de qualification de la conception du système de stockage d'hydrogène liquéfié du paragraphe 7.2**

157. Le confinement de l'hydrogène à l'intérieur du système de stockage d'hydrogène liquéfié est indispensable pour exclure toute fuite d'hydrogène vers le milieu environnant et les systèmes situés en aval. Les essais fonctionnels décrits au paragraphe 7.2 visent à démontrer que le système de stockage présente un niveau de sécurité suffisant en cas de rupture du réservoir, et peut assurer les fonctions essentielles pendant toute la durée de service, y compris pendant les cycles de pression auxquels il est soumis dans les conditions normales d'utilisation, en cas de surpression, en conditions extrêmes et anormales, et en cas d'incendie.

158. Les prescriptions en matière d'essais fonctionnels pour tous les systèmes de stockage d'hydrogène liquéfié destinés aux véhicules routiers sont énoncées au paragraphe 7.2. Ces critères s'appliquent à la qualification des systèmes de stockage destinés à équiper des véhicules neufs.

159. La présente section expose l'argumentation concernant les prescriptions fonctionnelles énoncées au paragraphe 7.2 pour ce qui est de l'intégrité du système de stockage d'hydrogène liquéfié. Les fabricants doivent veiller à ce que toutes les unités produites satisfassent aux prescriptions des essais fonctionnels de vérification des paragraphes 7.2.1 à 7.2.4.

a) **Argumentation concernant le paragraphe 7.2.1 : Essais de vérification des caractéristiques de référence des systèmes de stockage d'hydrogène liquéfié**

160. L'essai de pression d'épreuve et l'essai de pression d'éclatement initiale de référence sont destinés à démontrer l'aptitude structurelle de l'enveloppe interne du réservoir.

i) *Argumentation concernant les prescriptions de pression d'épreuve des paragraphes 7.2.1.1 et 7.4.1.1*

161. Compte tenu de la conception du réservoir et des spécifications concernant les limites de pression en conditions normales et en conditions dégradées (comme démontré aux paragraphes 7.4.2.2 et 7.4.2.3), la pression dans l'enveloppe interne pourrait atteindre 110 %

de la pression de service maximale admissible (PSMA) en cas d'anomalie déclenchant le dispositif de décompression primaire, et au maximum 150 % de la PSMA dans le cas le plus défavorable, c'est-à-dire lorsque le dispositif de décompression primaire est défaillant et que le dispositif de décompression secondaire doit se déclencher et protéger le système. L'objet de l'essai de pression d'épreuve à 130 % de la PSMA est de démontrer que la limite d'élasticité de l'enveloppe interne n'est pas atteinte à cette pression.

- ii) *Argumentation concernant les prescriptions de l'essai de pression d'éclatement initiale de référence : paragraphes 7.2.1.2 et 7.4.1.2*

162. Par conception (et comme démontré au paragraphe 5.2.3.3), la pression nécessaire au déclenchement du (des) dispositif(s) de décompression secondaire(s) (de secours) peut atteindre 150 % de la PSMA. L'essai d'éclatement vise à démontrer qu'il subsiste une marge de sécurité avant l'éclatement du réservoir dans le cas le plus défavorable. Les pressions d'essai couramment appliquées pour déterminer cette marge dans le cas des enveloppes internes métalliques sont les suivantes : PSMA (en MPa) plus 0,1 MPa, multipliée par 3,25, ou PSMA (en MPa) plus 0,1 MPa, multipliée par 1,5 et multipliée par R_m/R_p (où R_m est la résistance à la traction et R_p la limite minimale d'élasticité du matériau du réservoir).

163. En outre, l'obtention de valeurs de pression élevées lors des essais d'éclatement (si les matériaux ont été correctement choisis) démontre que les niveaux de contrainte conçus sont raisonnablement bas, ce qui signifie que les réservoirs métalliques dont la conception est étayée par les calculs devraient résister aux cycles de fatigue. Dans le cas des réservoirs non métalliques, un essai supplémentaire visant à démontrer cette résistance est prescrit au paragraphe 7.4.1.2, car les procédures de calcul n'ont pas encore été normalisées pour ces matériaux.

b) Argumentation concernant la vérification des caractéristiques attendues en utilisation sur route : paragraphe 7.2.2

- i) *Argumentation concernant les prescriptions relatives à la gestion des évaporats : paragraphes 7.2.2.1 et 7.4.2.1*

164. En utilisation normale, le système de gestion des évaporats doit limiter la pression à une valeur inférieure à la PSMA. Les conditions les plus critiques, pour le système de gestion des évaporats, sont atteintes lors d'une période de stationnement après un remplissage au niveau maximal du système de stockage d'hydrogène liquéfié, avec une période de refroidissement limitée à 48 h au maximum.

- ii) *Argumentation concernant les prescriptions d'essais de fuite d'hydrogène : paragraphes 7.2.2.2 et 7.4.2.2*

165. L'essai de fuite d'hydrogène doit être exécuté pendant le rejet des évaporats du système de stockage d'hydrogène liquéfié. Les fabricants décident en général de traiter la totalité (ou la majeure partie) de l'hydrogène qui s'échappe du réservoir, mais afin de disposer d'un critère de rejet d'hydrogène comparable à celui qui est appliqué au système de stockage d'hydrogène comprimé, il convient d'ajouter la quantité d'hydrogène rejetée par le système de gestion des évaporats avec les fuites éventuelles de manière à déterminer le débit de rejet total du véhicule.

166. Après correction, le débit de fuite admissible d'un véhicule équipé d'un système de stockage d'hydrogène liquéfié est le même que celui d'un véhicule équipé d'un système de stockage d'hydrogène comprimé. Selon l'analyse figurant aux paragraphes 62 et 63 du point 1.c) de la section E du préambule, le débit de fuite/perméation total d'un véhicule équipé d'un système de stockage à hydrogène liquéfié peut donc atteindre 150 ml/min pour un garage de 30,4 m³. Comme dans le cas de l'hydrogène comprimé, le facteur d'échelle $[(V_{width} + 1) * (V_{height} + 0,05) * (V_{length} + 1)/30,4]$ permet de calculer le débit de fuite/perméation maximal pour d'autres combinaisons garage/véhicule, notamment dans le cas des petits véhicules stationnant dans de petits garages.

167. Avant d'exécuter l'essai, on force le déclenchement du dispositif de décompression primaire de manière à vérifier l'aptitude de ce dispositif à se refermer et à satisfaire aux prescriptions concernant le débit de fuite.

iii) *Argumentation concernant la prescription relative à la perte de vide :*
paragraphes 7.2.2.3 et 7.4.2.3

168. Afin de démontrer le bon fonctionnement des dispositifs de décompression et le respect des limites de pression admissibles dans le système de stockage d'hydrogène liquéfié décrites au point 2.b) de la section G et vérifiées conformément au paragraphe 7.2.2.3, on considère qu'une perte de vide soudaine due à une entrée d'air dans l'enveloppe à vide isolant constitue le cas le plus défavorable. L'apport thermique lié à une entrée de gaz dans l'enveloppe à vide isolant et l'augmentation de température de l'enveloppe interne qui en découle sont nettement plus élevés dans le cas de l'air que dans celui de l'hydrogène, en raison de la condensation de l'air sur les surfaces froides et de l'évaporation de l'air sur les surfaces chaudes à l'intérieur de l'enveloppe à vide isolant.

169. Le dispositif de décompression primaire doit être une soupape de surpression de type à refermeture automatique, afin que l'évacuation d'hydrogène cesse lorsque l'effet de la défaillance s'atténue. Conformément aux normes de conception reconnues au niveau mondial, le seuil de déclenchement complet de ces soupapes est supérieur au maximum de 10 % à la valeur de consigne, compte tenu des tolérances admissibles concernant la valeur de consigne elle-même. Étant donné que la valeur de consigne devrait être égale ou inférieure à la PSMA, la pression lors de la simulation d'une défaillance censée déclencher le dispositif de décompression primaire ne devrait pas dépasser 110 % de la PSMA.

170. Les dispositifs de décompression secondaires ne devraient pas se déclencher lors de la simulation d'une perte de vide censée activer le dispositif de décompression primaire, car cela pourrait provoquer une instabilité du système et une usure inutile de ces dispositifs secondaires. Pour démontrer que les dispositifs de décompression sont à sécurité positive et que le dispositif de décompression secondaire est conforme aux prescriptions des paragraphes 7.2.2.3 et 7.4.2.3, un deuxième essai doit être effectué avec le dispositif de décompression primaire bloqué en position fermée. Dans ce cas, le dispositif secondaire peut être soit une soupape de surpression, soit un disque de rupture, et la pression maximale admissible au cours de la simulation d'une perte de vide est de 136 % de la PSMA (soupape de surpression) ou 150 % de la PSMA (disque de rupture).

c) **Argumentation concernant le paragraphe 7.2.3 : Essai de vérification du comportement au feu : brasier (conditions justifiant le retrait du service)**

171. Outre une perte de vide partielle ou totale, le feu peut aussi causer une surpression dans les systèmes de stockage d'hydrogène liquéfié, et le fonctionnement correct des dispositifs de décompression doit par conséquent être démontré lors de l'épreuve du brasier.

d) **Argumentation concernant le paragraphe 7.2.4 : Essai de vérification des composants du système de stockage d'hydrogène liquéfié (dispositifs de décompression et vanne d'arrêt)**

i) *Argumentation concernant le paragraphe 7.2.4.1 : Prescriptions de qualification des dispositifs de décompression (hydrogène liquéfié)*

172. Les prescriptions de qualification ont pour objet de vérifier que la conception est telle que le ou les dispositifs limiteront la pression dans le réservoir aux valeurs spécifiées même en fin de vie utile, après avoir été exposé(s) aux variations de température et de pression liés aux cycles de remplissage/vidage et aux facteurs environnementaux. Les prescriptions de l'essai du brasier et de l'essai de perte de vide du système de stockage d'hydrogène permettent de vérifier que le débit de purge est suffisant pour une application donnée (par. 7.2.3 et 7.4.3).

ii) *Argumentation concernant le paragraphe 7.2.4.2 : Prescriptions de qualification des vannes d'arrêt (hydrogène liquéfié)*

173. Ces prescriptions ne visent pas à interdire les variantes de conception et de fabrication de composants (composants à fonctions multiples, par exemple) qui ne sont pas expressément prescrites dans le présent Règlement, à condition que ces variantes aient été prises en considération pour l'essai des composants. Lors de l'étude des variantes de conception ou de fabrication, les matériaux et la méthode appliquée doivent être évalués par le laboratoire d'essai afin de garantir que les caractéristiques résultantes et les concepts visant à assurer un niveau de sécurité raisonnable sont équivalents à ceux prescrits dans le présent Règlement. Dans ce cas, le nombre d'échantillons et l'ordre des essais applicables doivent être fixés d'un commun accord par le constructeur et le laboratoire d'essai. Sauf indication contraire, tous les essais doivent être exécutés avec un gaz sous pression tel que l'air ou l'azote contenant au moins 10 % d'hélium. Le nombre total de cycles de fonctionnement est fixé à 20 000 pour les vannes d'arrêt automatiques.

174. Le système de coupure d'une vanne d'arrêt automatique montée sur un réservoir de stockage d'hydrogène liquéfié doit être du type à sécurité positive. Par « dispositif à sécurité positive », on entend un dispositif qui passe en mode sécurité ou assure un arrêt complet et sûr quelle que soit la défaillance susceptible de se produire.

175. Les essais électriques de qualification d'une vanne d'arrêt automatique montée sur des réservoirs de stockage d'hydrogène liquéfié permettent de s'assurer que ce dispositif fonctionne correctement : i) en cas de surchauffe causée par une surtension, et ii) en cas de défaillance de l'isolation entre le conducteur d'alimentation et le boîtier du composant.

3. Argumentation concernant les prescriptions de qualification de la conception du système d'alimentation en carburant du véhicule (hydrogène liquéfié)

176. On trouvera ci-après les prescriptions relatives à l'intégrité du système d'alimentation en hydrogène, qui comprend le système de stockage d'hydrogène liquéfié, les tuyauteries, les raccords et les composants contenant de l'hydrogène. Ces prescriptions s'ajoutent à celles du paragraphe 5.2, qui s'appliquent toutes aux véhicules équipés d'un système de stockage d'hydrogène liquéfié, sauf celles du paragraphe 2.1.1. L'étiquette apposée sur l'embout de remplissage doit indiquer que l'hydrogène liquéfié est le type de carburant à utiliser. Les procédures d'essai sont décrites au paragraphe 7.5.

4. Argumentation concernant les procédures d'essai applicables aux systèmes de stockage d'hydrogène liquéfié

177. L'argumentation concernant les procédures d'essai est incluse dans l'argumentation concernant les prescriptions fonctionnelles aux points 2.a) et 2.b) de la section G du préambule.

5. Argumentation concernant le paragraphe 7.5 : Procédure d'essai pour la mesure des concentrations après un choc pour les véhicules équipés d'un système de stockage d'hydrogène liquéfié

178. Comme pour les véhicules équipés d'un système de stockage d'hydrogène comprimé, il est possible de mesurer directement la concentration en hydrogène ou indirectement en mesurant la diminution de la concentration en oxygène.

179. Si on utilise de l'azote liquide pour l'essai de choc, la concentration d'hélium dans l'habitacle et les compartiments à bagages et à marchandises peut être mesurée au cours de l'essai d'étanchéité à l'hélium qui est exécuté après l'essai de choc. Il est possible de définir une concentration d'hélium qui soit équivalente à 4 % d'hydrogène en volume, mais la relation, en plus de tenir compte des différences de propriétés physiques des gaz, doit être corrigée en raison de la différence de température des gaz, c'est-à-dire entre la température de l'hydrogène dans le système de stockage d'hydrogène liquéfié en fonctionnement et la température de l'hélium pendant l'essai d'étanchéité. L'hydrogène liquéfié stocké (et ses fuites) sont à des températures cryogéniques (-253 °C ou 20 K), mais le système est pratiquement à la température ambiante (20 °C ou 293 K) pour l'essai d'étanchéité. Dans ce

cas, les équations du point 1.a) de la section F peuvent être utilisées pour exprimer le ratio entre le débit massique de l'hélium et celui de l'hydrogène, comme suit :

$$W_{\text{He}}/W_{\text{H}_2} = C_{\text{He}}/C_{\text{H}_2} \times (M_{\text{He}}/M_{\text{H}_2})^{1/2} \times (T_{\text{H}_2}/T_{\text{He}})^{1/2}$$

et le ratio entre le débit volumique de l'hélium et celui de l'hydrogène, comme suit :

$$V_{\text{He}}/V_{\text{H}_2} = C_{\text{He}}/C_{\text{H}_2} \times (M_{\text{H}_2}/M_{\text{He}})^{1/2} \times (T_{\text{He}}/T_{\text{H}_2})^{1/2}$$

dont les termes sont définis à l'équation A.5.2.1.1. L'application du ratio de débits volumiques ci-dessus permet de tenir compte du fait que le système fonctionne à des conditions de stockage cryogénique et est soumis à un essai d'étanchéité à la température ambiante pour vérifier que la concentration volumique d'hydrogène dans le véhicule sera inférieure ou égale à 4 % en volume ; cette valeur correspond à une concentration volumique d'hélium admissible d'environ 0,8 %.

a) Argumentation concernant le paragraphe 7.5.1 : Essai d'étanchéité après choc d'un système de stockage d'hydrogène liquéfié

180. L'objet de l'essai est de vérifier que la quantité de carburant libérée après un essai de choc par un véhicule équipé d'un système à hydrogène liquéfié ne dépasse pas les valeurs prescrites. Le système est rempli soit d'hydrogène liquéfié au taux maximal de remplissage, soit d'azote liquéfié à un niveau équivalent au taux maximal de remplissage en hydrogène en poids (ce qui correspond environ à 8 % du volume maximal d'hydrogène liquéfié dans le système) en fonction du fluide utilisé pour l'essai de choc. Il est nécessaire d'appliquer un taux de remplissage en azote liquide d'environ 8 % pour simuler le poids du carburant pour l'essai de choc, et on ajoute une petite quantité supplémentaire d'azote liquide pour tenir compte du refroidissement du système et des pertes par évacuation avant l'essai. Une détection visuelle des fuites inacceptables après le choc, telles que définies au paragraphe 7.5.1.1, n'est envisageable que s'il est possible d'inspecter visuellement le système à hydrogène liquéfié après le choc. Si on utilise un fluide d'essai normalisé, le diamètre des bulles est en principe égal à 1,5 mm environ. Un débit de fuite localisé de 0,005 mg/s (216 Nm/h) correspond à la formation d'environ 2 030 bulles par minute. Même avec des bulles beaucoup plus grandes, la fuite doit être aisément détectable. Par exemple, pour un diamètre de 6 mm, on observerait la formation d'environ 32 bulles par minute, ce qui représente un critère très facile à contrôler si tous les raccords et toutes les parties vulnérables sont accessibles pour une inspection après le choc.

181. S'il n'est pas possible ou souhaitable de procéder à un essai de bulles, on peut effectuer un essai d'étanchéité global afin d'obtenir des résultats plus objectifs. Dans ce cas, le critère de fuite est le même que celui fixé pour les véhicules équipés d'un système de stockage d'hydrogène comprimé. Plus précisément, le débit de fuite admissible pour le système de stockage d'hydrogène liquéfié est de 118 NI/min ou 10,7 g/min. Le gaz qui s'échappe peut être à l'état gazeux, liquide ou biphasique. Il est probable que les fuites soient à l'état gazeux, étant donné que les tuyauteries et les vannes d'arrêt situées en aval du réservoir sont plus vulnérables aux dégâts causés par un choc que le réservoir à double paroi fortement isolé du système de stockage. Néanmoins, les essais après un choc prescrits dans le présent document permettent de détecter de très petites fuites et d'obtenir des résultats concluants même si les fuites sont à l'état liquide. Il n'y a pas lieu de prendre en compte la possibilité de fuites sous forme biphasique, car le débit sera alors moindre qu'à l'état liquide.

182. L'essai d'étanchéité après un choc visé au paragraphe 7.5.1.2.1 est effectué avec de l'hélium sous pression. Cet essai permet non seulement de vérifier que le débit de fuite du système de stockage est acceptable, mais aussi d'effectuer simultanément l'essai de mesure de la concentration d'hélium après un choc, tel qu'il est décrit aux paragraphes 144 à 146 du point 1.b) de la section F du préambule. L'essai d'étanchéité à l'hélium est effectué à température ambiante, le système de stockage contenant de l'hélium à la pression normale de fonctionnement. La pression doit être inférieure à la pression de déclenchement des détendeurs et des dispositifs de décompression. Il devrait être possible d'exécuter l'essai de pression à l'hélium à environ 80 % de la PSMA.

Le débit de fuite d'hydrogène à l'état liquide d'un système en fonctionnement est donné par la formule :

$$W_1 = C_d \times A \times (2 \times \rho_1 \times \Delta P_1)^{1/2} \quad \text{Équation A.7.5.1-1}$$

où W_1 est le débit massique, C_d le coefficient de débit de l'orifice, A la section de l'orifice, ρ la densité et ΔP_1 la différence de pression entre le système en fonctionnement et l'atmosphère. Cette équation est applicable aux fluides incompressibles tels que les fluides à l'état liquide. L'application de cette équation correspond à une évaluation très prudente dans le cas présent. En effet, il est fréquent qu'une partie du fluide se vaporise instantanément (c'est-à-dire qu'elle passe à l'état gazeux) au passage dans l'orifice de fuite, ce qui réduit la densité du fluide et par conséquent son débit massique.

Le débit de fuite d'hélium gazeux au cours de l'essai d'étanchéité est donné par la formule :

$$W_{He} = C \times C_d \times A \times (\rho_{He} \times P_{He})^{1/2} \quad \text{Équation A.7.5.1-2}$$

C_d et A sont définis ci-dessus, ρ et P sont la densité et la pression du fluide (immobile) en amont dans le système de stockage. C est donné par la formule :

$$C = \gamma / ((\gamma + 1)/2)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \quad \text{Équation A.7.5.1-3}$$

où γ est le coefficient de Laplace du gaz qui s'échappe.

Étant donné que C_d et A sont des constantes et sont identiques pour l'hydrogène liquéfié s'échappant du réservoir en utilisation réelle et l'hélium gazeux s'échappant lors de l'essai d'étanchéité, le ratio entre le débit de fuite d'hélium et celui de l'hydrogène liquéfié peut être calculé à l'aide de la formule :

$$W_{He}/W_1 = C_{He} \times (\rho_{He}/\rho_1)^{1/2} \times (P_{He}/(2 \times \Delta P_1))^{1/2} \quad \text{Équation A.7.5.1-4}$$

L'équation A.7.5.1-4, établie à partir des équations A.7.5.1-1 et A.7.5.1-2, peut être utilisée pour calculer le débit massique d'hélium au début de l'essai de pression ; cependant, la pression diminue au cours de l'essai de pression, alors qu'elle reste pratiquement constante jusqu'à ce que tout le liquide ait été évacué dans le cas d'un réservoir à hydrogène liquéfié en fonctionnement.

183. Pour déterminer avec précision la baisse de pression admissible au cours de l'essai d'étanchéité, il faut tenir compte de la variation du débit d'hélium en fonction de la pression. Étant donné que la densité de l'hélium (ρ_{He}) varie avec la pression, le débit massique d'hélium au cours de l'essai de pression varie aussi de manière linéaire avec la pression selon la formule :

$$W_t = P_t \times (W_{He}/P_{He}) \quad \text{Équation A.7.5.1-5}$$

où W_t et P_t sont le débit massique et la pression d'hélium au cours de l'essai de pression et W_{He} et P_{He} les valeurs initiales lors de l'essai d'étanchéité.

On part de l'équation des gaz parfaits :

$$P_t \times V = M_t \times R_g \times T \quad \text{Équation A.7.5.1-6}$$

où P_t est la pression d'essai, V est le volume du réservoir d'hydrogène liquéfié, M_t est la masse du réservoir, R_g est la constante spécifique de l'hélium gazeux, et T est la température du réservoir d'hydrogène liquéfié. Le calcul de la différentielle de l'équation 6 par rapport au temps donne la formule :

$$\partial P_t / \partial t = R_g \times T / V \times \partial M_t / \partial t \quad \text{Équation A.7.5.1-7}$$

où $\partial P_t / \partial t$ est la variation de pression au cours de l'essai de pression à l'hélium. Étant donné que la variation de masse dans le réservoir d'hydrogène liquéfié ($\partial M_t / \partial t$) sur la durée de l'essai est égale au débit massique d'hélium (W_t), on peut remplacer W_t par l'équation 5 dans l'équation 7. Après réagencement des termes, l'équation devient :

$$\partial P_t / P_t = R_g \times T / V \times (W_{He}/P_{He}) \times \partial t = (W_{He}/M_{He}) \times \partial t \quad \text{Équation A.7.5.1-8}$$

où M_{He} est la masse initiale d'hélium dans le réservoir d'hydrogène liquéfié pour l'essai de pression.

L'intégration de l'équation différentielle ci-dessus donne les expressions suivantes pour la pression admissible $P_{\text{allowable}}$ à la fin de l'essai d'étanchéité à l'hélium et la perte de pression admissible correspondante $\Delta P_{\text{allowable}}$ sur la durée de l'essai :

$$P_{\text{allowable}} = P_{\text{He}} \times \exp(-W_{\text{He}}/M_{\text{He}} \times t_{\text{period}}) \quad \text{Équation A.7.5.1-9}$$

et

$$\Delta P_{\text{allowable}} = P_{\text{He}} \times (1 - \exp(-W_{\text{He}}/M_{\text{He}} \times t_{\text{period}})) \quad \text{Équation A.7.5.1-10}$$

où t_{period} est la durée de l'essai.

184. La meilleure façon d'illustrer l'utilisation des équations ci-dessus est de donner un exemple : prenons le cas d'un véhicule de tourisme typique équipé d'un réservoir d'hydrogène liquéfié de 100 l. Par principe, les valeurs des paramètres de sécurité fondamentaux sont identiques à celles d'un système de stockage d'hydrogène comprimé. Plus précisément, la durée de l'essai d'étanchéité est de 60 min et le débit de fuite moyen de H_2 doit être équivalent à 10,7 g/min. L'application de ces paramètres à l'exemple ci-dessus donne les valeurs suivantes :

Durée de l'essai après choc (t_{period}) = 60 min

Débit de fuite admissible de H_2 liquide (W_1) = 10,7 g/min = 118 NI/min de gaz après évaporation instantanée

PSMA = 6 atm (pression manométrique) = 7 atm (pression absolue)

Pression d'hélium choisie pour l'essai (P_{He}), inférieure à la valeur de consigne du détendeur = 5,8 atm (pression absolue)

Coefficient de Laplace (γ) de l'hélium = 1,66

C de l'hélium = 0,725 (selon l'équation A.7.5.1-3)

Masse volumique de l'hélium à la pression d'essai initiale = 0,956 g/l

Masse volumique de l'hydrogène liquéfié = 71,0 g/l

Perte de pression par fuite pour l'hydrogène liquéfié (ΔP_1) = 5,8 atm - 1 atm = 4,8 atm

Ratio entre le débit de fuite massique d'hélium et celui de l'hydrogène liquéfié (W_{He}/W_1) = 0,0654

Débit de fuite admissible initial d'hélium (W_{He}) = 0,70 g/min = 3,92 NI/min

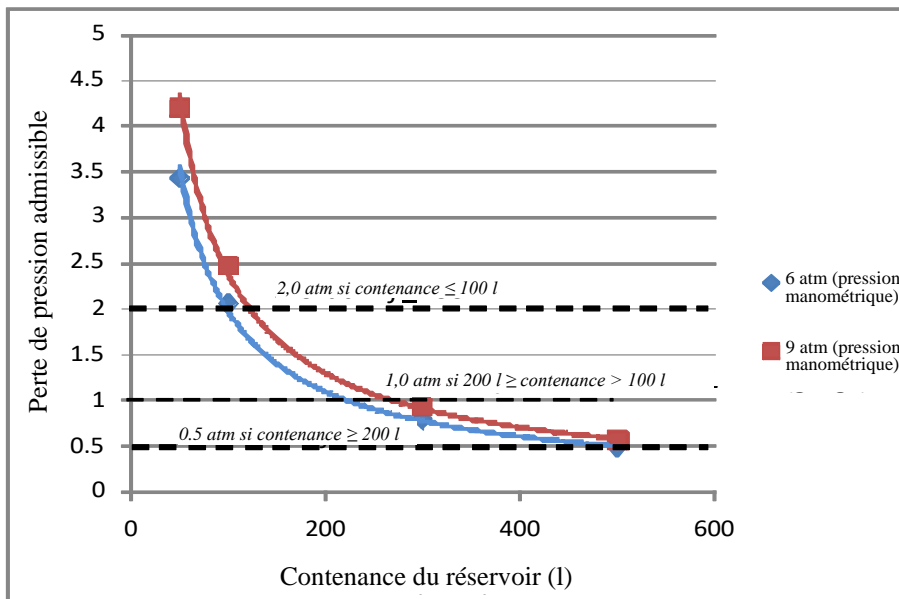
Masse initiale d'hélium dans le réservoir à hydrogène liquéfié pour l'essai (M_{He}) = 95,6 g (selon l'équation A.7.5.1-6)

Perte de pression admissible pour l'hélium ($\Delta P_{\text{allowable}}$) = 2,06 atm (selon l'équation A.7.5.1-10).

185. L'exemple ci-dessus montre comment déterminer la perte de pression de l'hélium sur la durée de l'essai d'étanchéité (60 min) à l'aide des équations. Les calculs ont été répétés sur les plages probables de volume (50 l à 500 l) et de pression nominale typique (6 atm à 9 atm de pression manométrique) du réservoir pour appréhender la relation entre la perte de pression admissible et les paramètres clefs (voir la figure 37). Étant donné que la perte de pression admissible est (le plus souvent largement) supérieure à 0,5 atm pour toutes les dimensions probables de réservoir, il a été décidé d'appliquer un critère simple de 0,5 atm pour tous les réservoirs de contenance supérieure à 200 l, afin de simplifier l'exécution de l'essai d'étanchéité et la détermination des critères de réussite correspondants. Pour les mêmes raisons, un critère de 2 atm a été adopté pour les réservoirs de contenance inférieure ou égale à 100 l, et un critère de 1 atm pour les réservoirs de contenance supérieure à 100 l et inférieure ou égale à 200 l.

Figure 37

Perte de pression admissible au cours de l'essai d'étanchéité d'un réservoir à hydrogène liquéfié



186. Si cette méthodologie permet d'appliquer une méthode d'essai simple donnant des résultats objectifs à partir d'un type d'essai couramment utilisé, il convient de noter que le critère de réussite est très prudent dans la mesure où la méthodologie repose sur l'hypothèse que les fuites au niveau des tuyauteries et vannes situées en aval du réservoir d'hydrogène liquéfié sont liquides plutôt que gazeuses. Ainsi, par exemple, si l'on détermine le débit de fuite d'hydrogène gazeux à l'aide de l'équation A.7.5.1-2, le ratio entre le débit de fuite d'hélium gazeux admissible et le débit de fuite d'hydrogène gazeux est 5,14 fois supérieur à celui obtenu en supposant que l'hydrogène qui s'échappe est sous forme liquide.

H. Prescriptions nationales concernant la compatibilité des matériaux (y compris la résistance à la fragilisation par l'hydrogène) et la conformité de production

1. Compatibilité des matériaux et résistance à la fragilisation par l'hydrogène

187. Le sous-groupe des questions de sécurité a reconnu l'importance des prescriptions concernant la compatibilité des matériaux et la résistance à la fragilisation par l'hydrogène et a entrepris des travaux sur ces questions. La conformité aux prescriptions concernant la qualification des matériaux garantit que les fabricants utilisent systématiquement des matériaux qui sont qualifiés de manière appropriée pour le stockage d'hydrogène et qui répondent aux exigences de conception des fabricants. Cependant, en raison de contraintes de temps et d'autres considérations d'ordre politique ainsi que technique, il n'a pas été possible de parvenir à un accord sur ces points au cours de la phase 1. Par conséquent, le sous-groupe des questions de sécurité a recommandé que les Parties contractantes continuent d'appliquer leurs prescriptions nationales relatives à la compatibilité des matériaux et à la résistance à la fragilisation par l'hydrogène et suggéré que la question de ces prescriptions soit reportée à la phase 2 des activités concernant le RTM ONU.

188. Au cours de la phase 2, des spécialistes de la compatibilité des matériaux issus de laboratoires nationaux et du monde universitaire ont cherché à normaliser les méthodes de sélection des matériaux destinés aux systèmes à hydrogène haute pression. L'objectif était de mettre au point des caractéristiques d'essai fonctionnel alignées avec les prescriptions concernant les véhicules à pile à combustible à hydrogène. Le résultat est un ensemble d'essais et de prescriptions concernant la résistance à la fatigue et les essais de traction à faible vitesse de déformation (SSRT), qui sont décrits dans la section M. En outre, des experts japonais ont constaté que certains alliages d'aluminium présentaient des fissures par

corrosion sous contrainte en présence de gaz humide (SCC-HG). Ils ont de ce fait mis au point une méthode d'essai pour évaluer la sensibilité des matériaux à ce type de corrosion, qui figure à la section N. Ces deux ensembles d'essais permettent d'évaluer la résistance des matériaux à la fragilisation par l'hydrogène et à la fissuration par corrosion sous contrainte en présence de gaz humide, et par conséquent d'élargir la gamme des matériaux qui pourront à l'avenir être utilisés pour les systèmes à hydrogène haute pression.

2. Prescriptions nationales complémentaires par rapport aux prescriptions du RTM ONU

189. Les prescriptions fonctionnelles de qualification (sect. 5) formulent des exigences relatives à la qualification pour l'utilisation sur route des systèmes de stockage d'hydrogène. L'objectif de l'harmonisation des prescriptions, tel qu'il est énoncé dans les Règlements techniques mondiaux ONU, est de permettre la mise au point par les Parties contractantes de véhicules qui répondent à des prescriptions uniformes et qui sont donc commercialisables dans le monde entier. Les prescriptions relatives à l'homologation de type devraient par conséquent se limiter à la conformité de production et aux vérifications connexes portant sur les caractéristiques des matériaux (y compris les prescriptions concernant la compatibilité des matériaux du point de vue de la résistance à la fragilisation par l'hydrogène).

I. Thèmes à prendre en compte pour la phase suivante d'élaboration du RTM ONU pour les véhicules à hydrogène

190. La mise au point et la commercialisation des véhicules fonctionnant à l'hydrogène n'en étant qu'à leurs débuts, on peut s'attendre à ce que des révisions des prescriptions soient suggérées après une période prolongée d'utilisation sur route réelle et sur la base d'évaluations techniques. Il est également prévu que lorsque l'expérience acquise ou le temps écoulé auront permis un examen technique plus poussé, les prescriptions relatives au système de stockage d'hydrogène liquéfié présentées en tant que prescriptions facultatives dans le présent document (sect. G du préambule) puissent être adoptées comme prescriptions avec les modifications appropriées.

191. Les thèmes qui pourraient être pris en compte au cours de la phase 3 sont les suivants :

- a) Prescriptions concernant la compatibilité des matériaux et la résistance à la fragilisation par l'hydrogène ;
- b) Prescriptions concernant l'embout de remplissage ;
- c) Évaluation de l'essai de rupture sous contrainte de longue durée proposé dans le cadre de la phase 1 ;
- d) Examen des résultats de recherche communiqués après l'achèvement de la phase 2 – en particulier, travaux traitant des systèmes de stockage d'hydrogène et de la sécurité après un choc ;
- e) Examen des solutions permettant aux Parties contractantes de poursuivre l'harmonisation ;
- f) Prescriptions concernant l'intégrité du système d'alimentation en carburant (examen approfondi de l'essai de choc arrière pour toutes les catégories de véhicules et de l'essai de choc latéral pour les véhicules utilitaires lourds, proposés par la CE et la Corée, respectivement) ;
- g) Examen des véhicules équipés d'un système de stockage d'hydrogène liquéfié (sect. 7) ;
- h) Amélioration des procédures d'essai au feu (résultats des essais comparatifs interlaboratoires, critères de résistance des réservoirs, etc.) ;
- i) Amélioration des procédures d'essai (questions relatives à l'évaluation des risques posés par les stations de distribution, TPRD distant, etc.).

192. La procédure d'essai suivante sera prise en considération pour l'essai de rupture sous contrainte de longue durée :

- a) Trois réservoirs fabriqués dans le nouveau matériau à essayer (par exemple un réservoir composite en polymère renforcé par de la fibre) doivent être soumis à un essai d'éclatement ; les pressions d'éclatement doivent se situer dans la plage $BP_0 \pm 10\%$ pour l'application considérée. Ensuite,
 - i) Trois réservoirs doivent être maintenus à une pression $> 80\%$ de la BP_0 et à une température de $65 (\pm 5)^\circ\text{C}$; ils doivent résister à l'éclatement pendant au moins 100 h ; le délai avant rupture doit être enregistré ;
 - ii) Trois réservoirs doivent être maintenus à une pression $> 75\%$ de la BPO et à $65 (\pm 5)^\circ\text{C}$; ils doivent résister à l'éclatement pendant au moins 1 000 h ; le délai avant rupture doit être enregistré ;
 - iii) Trois réservoirs doivent être maintenus à une pression $> 70\%$ de la BPO et à une température de $65 (\pm 5)^\circ\text{C}$; ils doivent résister à l'éclatement pendant au moins un an ;
 - iv) L'essai doit être arrêté après un an. Chaque réservoir ayant subi avec succès l'essai d'un an doit être soumis à un essai d'éclatement ; la pression d'éclatement doit être enregistrée ;
- b) Le diamètre du réservoir doit être $> 50\%$ du diamètre de l'application prévue et d'une construction comparable. Le réservoir peut être rempli avec un garnissage (pour réduire le volume intérieur) à condition que plus de 99 % de la surface intérieure demeure exposée ;
- c) Les réservoirs composites en fibre de carbone et/ou en alliages métalliques sont exemptés de cet essai ;
- d) Les réservoirs composites en fibre de verre dont la pression d'éclatement initiale est $> 350\%$ de la PSN sont exemptés de cet essai, auquel cas une pression d'éclatement $BP_{\min} = 350\%$ de la PSN doit être appliquée lors de l'essai prévu au paragraphe 5.1.1.1 (Pression d'éclatement initiale de référence) ;
- e) La pression d'éclatement de certains réservoirs en fibre de carbone dont la couche protectrice est en fibre de verre est accrue d'environ 2 %. Dans ce cas, il doit être démontré par calcul ou par une autre méthode que l'enveloppe en fibre de carbone seule (sans la couche en fibre de verre) peut résister à une pression égale ou supérieure à deux fois la pression de remplissage maximale. S'il peut être démontré que l'accroissement de pression d'éclatement dû à la couche protectrice en fibre de verre n'est pas supérieur à 2 % et si la pression d'éclatement est supérieure ou égale à 225% de la PSN $\times 1,02 = 230\%$ de la PSN, les calculs ci-dessus peuvent être omis.

J. Règlements, directives et normes internationales existantes

193. Les règlements et normes nationales existantes ainsi que les normes internationales liées à ce RTM ONU sont énumérés ci-dessous :

1. Intégrité du système d'alimentation en carburant du véhicule

- a) *Règlements nationaux et directives de l'Union européenne*
 - a) Union européenne – Règlement (UE) 2019/2144 du Parlement européen et du Conseil, annexe II, point A17 – Sécurité de l'hydrogène (renvoie au Règlement ONU n° 134) et point A18 – Qualification des matériaux des systèmes à hydrogène (renvoie au Règlement d'exécution (UE) 2021/535 de la Commission) ;

- b) Union européenne – Règlement d’exécution (UE) 2021/535 de la Commission, Annexe XIV – « Compatibilité des matériaux et embouts de remplissage des systèmes hydrogène » ;
 - c) Japon – Safety Regulation Article 17 and Attachment 17 – Technical Standard for Fuel Leakage in Collision ;
 - d) Japon – Attachment 100 – Technical Standard For Fuel Systems Of Motor Vehicle Fueled By Compressed Hydrogen Gas ;
 - e) Canada – (CMVSS) Méthode d’essai 301.1 – Étanchéité du circuit d’alimentation en carburant de type GPL ;
 - f) Canada – (CMVSS) Méthode d’essai 301.2 – Étanchéité du circuit d’alimentation en gaz naturel comprimé ;
 - g) Corée – Motor Vehicle Safety Standard, Article 17 et Article 91 – Fuel System Integrity ;
 - h) États-Unis – Federal Motor Vehicle Safety Standard (FMVSS) No. 301 – Fuel System Integrity ;
 - i) États-Unis – FMVSS No. 303 (1995) – Fuel System Integrity of Compressed Natural Gas Vehicles.
- b) *Normes nationales et internationales*
- a) ISO 17268:2020 – Dispositifs de raccordement pour le ravitaillement des véhicules terrestres en hydrogène gazeux ;
 - b) ISO 23273:2013 – Véhicules routiers alimentés par pile à combustible – Spécifications de sécurité – Protection contre les dangers de l’hydrogène pour les véhicules utilisant de l’hydrogène comprimé ;
 - c) ISO 14687:2019 – Qualité du carburant hydrogène – Spécification de produit ;
 - d) ISO 19880-8:2019 – Hydrogène gazeux – Stations de remplissage – Partie 8 : Contrôle qualité du carburant ;
 - e) ISO 19880-1:2020 - Carburant d’hydrogène gazeux – Stations-service – Partie 1 : Exigences générales ;
 - f) ISO 19881:2018 – Hydrogène gazeux – Réservoirs de carburant pour véhicules terrestres ;
 - g) ISO 19882:2018 – Hydrogène gazeux – Dispositifs limiteurs de pression thermiquement activés pour les conteneurs de carburant de véhicules à hydrogène comprimé ;
 - h) SAE J2578_201408 – Recommended Practice for General Fuel Cell Vehicle Safety ;
 - i) SAE J2600_201510 – Compressed Hydrogen Surface Vehicle Fuelling Connection Devices ;
 - j) SAE J2601_202005 – Fuelling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles ;
 - k) SAE J2799_201912 – Hydrogen Surface Vehicle to Station Communications Hardware and Software ;
 - l) SAE J2719_202003 – Hydrogen Fuel Quality for Fuel Cell Vehicles ;
 - m) Chine – GB/T 24548-2009 – Fuel cell electric vehicles – Terminology ;
 - n) Chine – GB/T 24549-2020 – Fuel cell electric vehicles – Safety requirements ;
 - o) Chine – GB/T 24554-2009 – Performance test methods for fuel cell engines ;
 - p) Chine – GB/T 26779-2021 – Hydrogen fuel cell electric vehicle refuelling receptacle ;

- q) Chine – GB/T 26990-2011 – Fuel cell electric vehicles – Onboard hydrogen system – Specifications ;
- r) Chine – GB/T 26991-2011 – Fuel cell electric vehicles – Maximum Speed – Test Method ;
- s) Chine – GB/T 29123-2012 – Specifications for hydrogen fuel cell vehicles in demonstration ;
- t) Chine – GB/T 29124-2012 – Hydrogen fuel cell vehicles facilities for demonstration specifications ;
- u) Chine – GB/T 29126-2012 – Fuel cell electric vehicles – Onboard hydrogen system – Test methods ;
- v) Chine – GB/T 34425-2017 – Fuel cell electric vehicles – Hydrogen refuelling nozzle ;
- w) Chine – GB/T 34593-2017 – Test methods of hydrogen emission for fuel cell engine ;
- x) Chine – GB/T 35154-2018 – Test methods of hydrogen emission for fuel cell electric vehicles ;
- y) Chine – GB/T 35178-2017 – Fuel Cell Electric Vehicles-Hydrogen Consumption – Test Methods ;
- z) Chine – GB/T 36288-2018 – Fuel Cell Electric Vehicle Safety Requirement of Fuel Cell Stack ;
- aa) Chine – GB/T 39132-2020 – Fuel cell electric vehicle engineering approval evaluation program ;
- ab) Chine – QC/T816-2009 – Specification of mobile hydrogen refuelling vehicles.

2. Système de stockage du carburant

- a) *Règlements nationaux et directives de l'Union européenne*
 - a) (fusionné avec TSG23-2021) ;
 - b) Chine – TSG23-2021 – Regulation on Safety Technology for Gas Cylinder ;
 - c) Japon – JARI S001(2004) – Technical Standard for Containers of Compressed Hydrogen Vehicle Fuel Devices ;
 - d) Japon – JARI S002(2004) – Technical Standard for Components of Compressed Hydrogen Vehicle Fuel Devices ;
 - e) Japon – KHK 0128(2010) – Technical Standard for Compressed Hydrogen Vehicle Fuel Containers with Maximum Filling Pressure up to 70 MPa ;
 - f) Japon – JARI S003(2018) – Technical Standard for Seamless Containers of Compressed Hydrogen Vehicle Fuel Devices ;
 - g) Japon – Attachment 11 to Circular Notice on Operation of Functionality Standards under the Regulation on Safety of Containers: Interpretation of Technical Standards for International Compressed Hydrogen Container for Automobile Fuel System ;
 - h) Japon – Attachment 12 to Circular Notice on Operation of Functionality Standards under the Regulation on Safety of Containers: Interpretation of Technical Standards for International Compressed Hydrogen Component for Automobile Fuel System ;
 - i) Corée – High Pressure Gas Safety Control Law ;
 - j) Corée – Public Notice on Safety Standard on Fuel Storage Systems for Motor Vehicles ;
 - k) États-Unis – FMVSS 304 (2022) – Compressed Natural Gas Fuel Container Integrity ;

- l) Union européenne – Règlement d'exécution (UE) 2021/535 de la Commission, Annexe XIV – « Compatibilité des matériaux et embouts de remplissage des systèmes hydrogène » ;
- b) *Normes nationales et internationales*
- a) CSA B51:19 – Code sur les chaudières, les appareils et les tuyauteries sous pression ;
- b) CSA/ANSI HGV 2:21 – Compressed Hydrogen Gas Vehicle Fuel Containers ;
- c) CSA/ANSI NGV 2:19 – Compressed Natural Gas Vehicle Fuel Containers ;
- d) CSA/ANSI HPRD 1:21 – Thermally Activated Pressure Relief Devices For Compressed Hydrogen Vehicle Fuel Containers ;
- e) CSA/ANSI HGV 3.1-2015 (R2019) – Fuel System Component for Hydrogen Gas Power Vehicles ;
- f) ISO 13985:2006 – Hydrogène liquide – Réservoirs de carburant pour véhicules terrestres ;
- g) ISO 15869:2009 – Hydrogène gazeux et mélanges d'hydrogène gazeux – Réservoirs de carburant pour véhicules terrestres (Caractéristiques techniques) ;
- h) ISO 19881:2018 – Hydrogène gazeux – Réservoirs de carburant pour véhicules terrestres ;
- i) SAE J2579_201806 – Standard for Fuel Systems in Fuel Cell and Other Hydrogen Vehicles ;
- j) Chine – QC/T 816-2009 – Hydrogen supplying and refuelling vehicles – Specifications.

K. Avantages et coûts du RTM ONU

194. À ce stade, on n'a pas tenté, dans le RTM ONU, de quantifier les coûts et avantages des mesures proposées. L'objectif du RTM ONU est de permettre une diffusion commerciale plus large des véhicules à pile à combustible à hydrogène. Or, les taux de progression et le degré de pénétration sur le marché qui en résultent ne sont pas actuellement connus ou susceptibles d'être évalués. Il n'a donc pas été possible de réaliser une analyse quantitative coûts-avantages.

195. Il est à prévoir cependant qu'une plus large pénétration sur le marché des véhicules de cette catégorie entraînera certains coûts. Ainsi, par exemple, la construction de l'infrastructure nécessaire pour que les véhicules à pile à combustible à hydrogène puissent remplacer de manière viable les véhicules classiques impliquera d'importants investissements publics ou privés, selon le pays. En particulier, au cours des premières années de commercialisation des véhicules à pile à combustible à hydrogène, ceux-ci risquent d'être plus chers à la fabrication et à l'achat que les véhicules classiques à essence ou diesel. Il est à noter toutefois que les surcoûts seront en grande partie financés de manière volontaire par les acheteurs et les constructeurs, car le choix du marché ne serait pas affecté.

196. Les Parties contractantes estiment cependant que les avantages du RTM ONU devraient compenser largement les coûts prévus. L'utilisation généralisée des véhicules à pile à combustible à hydrogène ainsi que la mise en place de l'infrastructure nécessaire à leur ravitaillement devraient permettre de réduire le nombre de véhicules à essence et à gazole circulant sur les routes, et par conséquent de diminuer la consommation mondiale de carburants d'origine fossile¹. Avantage peut-être le plus marquant, la réduction connexe des émissions de gaz à effet de serre et des polluants de référence (tels que le NO₂, le SO₂ et les

¹ Les procédés de production d'hydrogène renouvelable incluent l'électrolyse, la décomposition thermique de l'eau, la conversion thermo-chimique de la biomasse, la photolyse, la fermentation et la photoélectrolyse (*source* : <http://www.hydrogen.energy.gov/production.html>, consulté pour la dernière fois le 24 août 2011).

matières particulaires) devrait se traduire par des avantages sociétaux significatifs au fil du temps, grâce à l'atténuation des changements climatiques et à la réduction des dépenses de santé. L'adoption du RTM ONU pourrait aussi entraîner à terme une baisse des coûts de ravitaillement pour les utilisateurs de véhicules à pile à combustible à hydrogène, car la production d'hydrogène est potentiellement illimitée et devrait devenir plus rentable que la production de pétrole destinée aux véhicules classiques. En outre, la réduction de la demande de pétrole pourrait procurer des avantages sur le plan de la sécurité énergétique et de la sécurité nationale aux pays dans lesquels l'utilisation de ces véhicules serait généralisée, car cela réduirait leur dépendance aux importations de pétrole². En outre, bien que ces avantages ne puissent pas être directement attribués au RTM ONU, celui-ci pourrait faciliter le respect par les constructeurs des normes applicables en matière de réduction de la consommation de carburant et d'émissions de gaz à effet de serre, en stimulant la production et l'utilisation des véhicules à pile à combustible à hydrogène.

197. Les Parties contractantes n'ont pas non plus été en mesure d'évaluer l'incidence nette sur l'emploi du RTM ONU. Les nouveaux débouchés pour les activités de conception innovante et les technologies associées aux véhicules à pile à combustible à hydrogène pourraient créer un nombre appréciable d'emplois dans les pays ayant des liens avec la production de ces véhicules. En regard de ces gains toutefois, il convient de tenir compte des pertes d'emploi dues à la baisse de la production des véhicules classiques. La construction et la modernisation des infrastructures nécessaires pour stimuler la production et le stockage d'hydrogène entraîneront vraisemblablement un accroissement net du nombre d'emplois dans un avenir prévisible.

L. Considérations relatives à l'interopérabilité

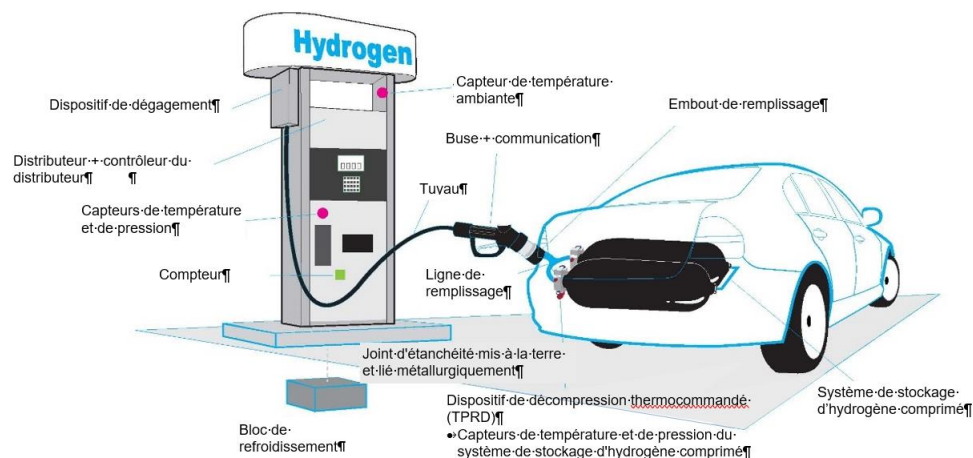
1. Principaux éléments à prendre en compte

198. La sécurité des véhicules à hydrogène dépend du bon fonctionnement du distributeur d'hydrogène et des commandes de la station de ravitaillement pendant l'opération de ravitaillement du véhicule. Il est donc important de souligner les éléments essentiels à la compréhension et à la prise en compte de l'interopérabilité entre la station de ravitaillement et un véhicule fonctionnant à l'hydrogène.

199. La figure 38 présente les principaux composants d'un distributeur d'hydrogène typique, y compris le système à hydrogène haute pression du véhicule, comprenant notamment l'embout de remplissage et le système de stockage d'hydrogène comprimé avec capteurs ainsi que le(s) dispositif(s) de décompression. Le système de stockage d'hydrogène comprimé est équipé d'un ou de plusieurs dispositifs de décompression thermocommandés afin de le protéger contre les surpressions dues à un incendie. Côté station, on trouve un système automatisé de commande de la distribution (par exemple, au moyen d'un automate programmable) qui permet d'effectuer le ravitaillement en carburant (à l'aide d'un protocole de ravitaillement acceptable tel que celui de la norme SAE J2601), ainsi que des procédures de détection et de gestion des pannes. La station est également équipée d'un dispositif de protection contre les surpressions, par exemple un ou plusieurs dispositifs de décompression ou équivalent, qui protège le distributeur et le véhicule.

² Tous les procédés de production d'hydrogène renouvelable décrits à la note 1 font appel à des ressources disponibles localement. Le gaz naturel, l'énergie nucléaire et le charbon peuvent être aussi d'origine nationale (*source* : <http://www.hydrogen.energy.gov/production.html>, consulté pour la dernière fois le 24 août 2011).

Figure 38
Composants clés d'un distributeur d'hydrogène typique, y compris le système à hydrogène haute pression du véhicule



200. Le distributeur d'une station de ravitaillement publique pour voitures particulières et utilitaires légers comporte généralement des buses distinctes permettant de faire le plein des véhicules à des pressions de services nominales de 35 MPa ou 70 MPa. La buse de ravitaillement de la station peut être équipée d'un récepteur de communication et le véhicule d'un émetteur de communication (tels que ceux prévus par la norme SAE J2799). Le système de communication Infrared Data Association (IrDA) du véhicule peut utiliser le protocole de la norme SAE J2799 pour transmettre au distributeur d'hydrogène la température et la pression mesurées du système de stockage d'hydrogène comprimé du véhicule. Le contrôleur du distributeur de la station peut utiliser ces données pour gérer l'opération de ravitaillement.

201. Des orientations détaillées sur les prescriptions générales relatives à l'interopérabilité entre la station de ravitaillement et un véhicule à hydrogène conforme au RTM ONU n° 13 figurent dans les normes ISO 17268:2020 ou SAE J2600_201510 sur les dispositifs de raccordement pour le ravitaillement des véhicules et dans la norme ISO 19880-1:2020 sur les stations de ravitaillement en hydrogène gazeux. On suppose qu'une station de ravitaillement conforme à la norme ISO et un véhicule à hydrogène conforme au RTM ONU n° 13 peuvent suivre le même protocole de ravitaillement.

2. Description de la norme SAE J2601

202. La norme SAE J2601 définit les protocoles et les limites opérationnelles relatives au ravitaillement en hydrogène des voitures particulières et utilitaires légers qui répondent aux prescriptions du RTM ONU n° 13.

203. Les protocoles de ravitaillement énoncés dans la norme SAE J2601 reposent sur un ensemble de conditions limites et initiales, qui correspondent aux systèmes de stockage d'hydrogène comprimé des voitures particulières et utilitaires légers actuels et aux composants de distribution de carburant qui interviennent dans le ravitaillement, côté véhicule comme côté station de distribution.

204. La norme SAE J2601 définit des protocoles de ravitaillement qui utilisent soit une table de recherche, auquel cas la vitesse de montée en pression est constante, soit une formule, auquel cas la vitesse de montée en pression est variable et calculée en continu tout au long de l'opération de ravitaillement. Le protocole basé sur une table de recherche donne un objectif fixe de pression en fin de remplissage, tandis que le protocole basé sur une formule calcule en continu l'objectif de pression en fin de remplissage. Les deux protocoles permettent de faire le plein avec ou sans communication. Pour le ravitaillement avec communication, on utilise la norme SAE J2601 conjointement avec la norme SAE J2799.

205. Dans le cas des stations d'hydrogène destinées au ravitaillement des véhicules utilitaires lourds, c'est la norme SAE J2601-2 qui s'applique.

3. Utilisation de la communication véhicule-station

206. L'utilisation de la communication véhicule-station améliore le processus de ravitaillement en fournissant au distributeur des informations sur le système de stockage d'hydrogène comprimé auquel il n'aurait pas accès autrement, telles que la pression de service nominale (par exemple H70, H35), le volume, la pression du gaz et la température du gaz. Le distributeur reçoit également un signal de commande de remplissage, qui lui indique si le remplissage peut commencer ou s'il doit être interrompu. Bien que ces données augmentent le niveau de sécurité, elles ne sont pas utilisées pour le contrôle primaire de l'opération de ravitaillement, car aucune prescription n'a été établie concernant la fiabilité des mesures des données du véhicule et de la liaison de communication. La norme SAE J2601 énonce que les données communiquées à la station peuvent être utilisées pour vérifier de manière secondaire la pression de service nominale du système de stockage d'hydrogène comprimé, pour déterminer son volume ainsi que le moment de la fin du remplissage, le taux de charge cible étant compris entre 95 à 100 %. Les données communiquées n'ont pas d'influence sur la vitesse de montée en pression appliquée par le distributeur – pour un volume donné, celle-ci est identique pour le ravitaillement avec ou sans communication.

207. La norme SAE J2799 prévoit une communication unidirectionnelle et des vérifications permettant de repérer les erreurs de transfert de données. Si une erreur de communication suffisamment importante est détectée ou si la communication s'interrompt, le contrôleur du distributeur applique le protocole de ravitaillement sans communication ou arrête le ravitaillement.

4. Validation des protocoles de ravitaillement et de communication véhicule-station

208. Il est important que la station de ravitaillement soit validée pour démontrer qu'elle applique correctement les protocoles de ravitaillement et de communication véhicule-station. Cette validation peut être effectuée au moyen d'essais de réception en usine, d'essais de réception sur site ou d'une combinaison des deux. Pour la validation des stations de ravitaillement faisant appel aux normes SAE J2601 et SAE J2799, il convient d'utiliser une norme de validation approuvée, telle que les normes CSA/ANSI HGV 4.3 ou HYSUT-G 0003 ou encore le protocole d'essai de validation du ravitaillement en hydrogène du Clean Energy Partnership.

209. La validation du protocole de ravitaillement vise à vérifier que le distributeur :

- a) Applique correctement les paramètres de contrôle ;
- b) Réagit correctement aux dépassements des limites opérationnelles ;
- c) Satisfait à certains critères de performance (c'est-à-dire qu'il est capable d'effectuer des remplissages sans dépasser les limites opérationnelles et d'atteindre un taux de charge acceptable).

210. La validation des communications entre le véhicule et la station vise à vérifier que le distributeur :

- a) Reçoit et interprète correctement les données communiquées ;
- b) Réagit correctement aux valeurs de données situées en dehors de la plage admissible ;
- c) Réagit correctement aux paquets de données erronés ;
- d) Réagit correctement aux données censées mettre fin au remplissage :
 - i) Une commande d'abandon ;
 - ii) Une température du gaz contenu dans le système de stockage d'hydrogène comprimé supérieure ou égale à 85 °C ;
 - iii) Un taux de charge du système de stockage d'hydrogène comprimé ≥ 100 %.

M. Évaluation des matériaux destinés aux systèmes à hydrogène

1. Introduction

211. Les prescriptions fonctionnelles (sect. 5) démontrent la capacité du système de stockage d'hydrogène à remplir des fonctions essentielles tout au long de la durée de vie de la plateforme du véhicule. Pour des raisons pratiques, les essais fonctionnels ne comprennent pas l'exécution de cycles de pression en fin de vie. Étant donné que la résistance à la fatigue des matériaux diminue dans un environnement d'hydrogène gazeux, il se peut que des lacunes subsistent dans l'évaluation de la résistance à la fatigue des matériaux soumis à un grand nombre de cycles de contrainte (> 500) en présence d'hydrogène gazeux. L'évaluation des matériaux destinés aux systèmes à hydrogène a été conçue pour examiner la résistance à la fatigue des matériaux dans un environnement d'hydrogène gazeux, en particulier dans le contexte des applications automobiles et de leur durée de vie prévue.

212. On sait que les propriétés structurelles des métaux se dégradent en présence d'hydrogène gazeux. En général, la résistance à la traction des métaux n'est pas modifiée, mais la ductilité, la résistance à la rupture et la résistance à la fatigue sont affectées. S'agissant des composants utilisés sur les véhicules, la diminution de la résistance à la fatigue et à la rupture due à l'hydrogène est une préoccupation majeure. Si les prescriptions de la section 5 tiennent compte des défaillances pertinentes pour le système de stockage d'hydrogène embarqué, il se peut que les essais pneumatiques ne permettent pas une évaluation complète de la résistance à la fatigue des matériaux destinés aux systèmes à hydrogène gazeux. On trouvera dans la présente section une méthode d'essai visant à présélectionner les métaux dont la résistance à la fatigue des matériaux dans un environnement d'hydrogène gazeux est suffisante au regard des contraintes appliquées et des conditions environnementales les plus défavorables. Les paramètres d'évaluation des essais sont définis de manière à garantir que les matériaux de construction sont adaptés à la résistance à la fatigue limitée du système de stockage d'hydrogène embarqué.

2. Argumentation concernant le paragraphe 220 : Spécification du matériau

213. Pour garantir que le matériau testé correspond à celui qui est utilisé pour la production, le matériau doit être défini par une spécification. Il peut s'agir d'une norme reconnue au niveau national ou d'une spécification propre à l'entreprise. La spécification doit préciser les fourchettes de composition ainsi que les caractéristiques en traction minimales (limite d'élasticité en traction S_y , résistance à la traction S_u et allongement en traction E_l). Les contraintes admissibles sont souvent déterminées à partir des caractéristiques de résistance minimales spécifiées, tandis que l'allongement fournit une évaluation qualitative de la détérioration non dangereuse. La vérification de la conformité du matériau à la spécification peut s'appuyer sur la certification en usine ou sur des essais effectués (ou sous-traités) par l'utilisateur. Les essais de vérification sont effectués en laboratoire. Aux fins de cette approche basée sur les performances, on suppose que les matériaux sont suffisamment peu sensibles à la variabilité, par exemple de composition.

214. Les techniques d'assemblage doivent être contrôlées à l'aide d'un descriptif de mode opératoire de soudage, qui comprend des prescriptions identiques à celles de la spécification des matériaux (en particulier les propriétés mécaniques, bien que les valeurs puissent être différentes : $S_y(w)$, $S_u(w)$ et $E_l(w)$). Cela permet de garantir que les propriétés du matériau assemblé sont connues et que les prescriptions minimales sont précisées. La structure assemblée doit être évaluée dans un environnement d'hydrogène gazeux de la même manière que les matériaux de base, en prélevant des éprouvettes dans la mesure du possible (ou une éprouvette représentative, également définie dans le descriptif de mode opératoire de soudage) pour vérifier que le raccord répond aux prescriptions énoncées. Les propriétés mécaniques d'un joint métallurgique dépendent du procédé de soudage et de la configuration des éprouvettes prélevées sur le joint. Les effets de l'hydrogène sur le joint dépendent également des matériaux, du procédé de soudage et des conditions de soudage.

3. Argumentation concernant le paragraphe 221 : Conditions environnementales de l'essai

215. Argumentation concernant le degré de pureté du gaz. De petites quantités d'impuretés gazeuses (en particulier l'oxygène) peuvent avoir des effets considérables sur les caractéristiques mesurées dans un environnement d'hydrogène gazeux. L'oxygène (et d'autres espèces chimiques) peut s'adsorber à la surface de l'éprouvette et empêcher l'hydrogène de pénétrer dans celle-ci pendant toute la durée de l'essai. Si les effets des impuretés ont été peu étudiés pour les essais de traction et de résistance à la fatigue, les essais de propagation de fissures de fatigue montrent sans équivoque les effets de l'oxygène sur les vitesses de propagation mesurées (B.P. Somerday, P. Sofronis, K.A. Nibur, C. San Marchi et R. Kirchheim, « Elucidating the variables affecting accelerated fatigue crack growth of steels in hydrogen gas with low oxygen concentrations », *Acta Materiala*, vol. 61, p. 6153-6170, 2013). Pour minimiser l'influence des impuretés, le volume d'essai doit être purgé correctement afin que l'environnement d'essai ne contienne plus d'air. On constate généralement que l'environnement d'essai et le gaz prélevé ne sont pas aussi « propres » que le gaz source. Par conséquent, la pureté du gaz d'essai doit être contrôlée périodiquement afin de garantir que la procédure de purge est adéquate. La qualité du gaz d'essai doit être vérifiée au moins une fois tous les 12 mois, conformément aux pratiques normalisées de vérification des transducteurs dans les installations d'essai. Le tableau 6 indique les taux d'impureté admissibles (dans le gaz source), car la purge ne peut jamais éliminer la totalité de l'oxygène et de l'eau. Les prescriptions du tableau 6 sont conformes à celles de la norme CSA/ANSI CHMC 1-2014 (Test methods for evaluating material compatibility in compressed hydrogen applications – Metals).

216. Argumentation concernant la pression d'essai. La pression d'essai minimale doit être égale à 125 % de la PSN pour garantir que les effets de la pression sont détectés et représentatifs de la pression de service maximale en fonctionnement normal. Les essais peuvent être exécutés à des pressions plus élevées (> 125 % de la PSN) – par exemple, les données des essais à une pression de 100 MPa peuvent être utilisées pour qualifier les matériaux dans un système dont la PSN est de 70 MPa, puisque la pression d'essai doit être $\geq 87,5$ MPa. Bien que les essais de pression d'épreuve puissent être réalisés à une pression inférieure ou égale à 150 % de la PSN et que, dans des conditions anormales, les matériaux puissent être soumis à une pression pouvant atteindre 150 % de la PSN, les effets de l'hydrogène ne varient pratiquement pas entre 125 % et 150 % de la PSN (H. Kobayashi, T. Yamada, H. Kobayashi, S. Matsuoka, « Criteria for selecting materials to be used for hydrogen refuelling station equipment », PVP2016-64033, Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Division Conference, Vancouver, Colombie-Britannique, Canada, 17-21 juillet 2016). Par conséquent, par souci de cohérence avec les conditions normales de fonctionnement et les essais de résistance à la fatigue, la pression d'essai pour les essais de traction à faible vitesse de déformation est fixée à 125 % de la PSN.

217. Argumentation concernant la température d'essai. On considère généralement que la plage de fonctionnement du véhicule est comprise entre 233 K et 358 K (-40 °C et +85 °C). La ductilité à la traction de certains matériaux diminue aux températures ambiantes proches de la limite inférieure de cette plage ; la ductilité à la traction atteint généralement un minimum compris entre 200 K et 220 K (S. Fukuyama, D. Sun, L. Zhang, M. Wen et K. Yokogawa, « Effect of temperature on hydrogen environment embrittlement of type 316 series austenitic stainless steels at low temperature », *J. Japan Inst. Met.*, Vol. 67, pp. 456-459, 2003 ; L. Zhang, M. Wen, M. Imade, S. Fukuyama, K. Yokogawa, « Effect of nickel equivalent on hydrogen gas embrittlement of austenitic stainless steels based on type 316 at low temperatures », *Acta Materiala*, vol. 56, p. 3414-3422, 2008). Par conséquent, la température retenue pour les essais de traction à faible vitesse de déformation a été prudemment fixée à 228 ± 5 K, ce qui correspond à cette limite inférieure. Contrairement aux caractéristiques en traction, la résistance à la fatigue reste généralement inchangée à basse température (J. Schijve, *Fatigue of Structures and Materials*, 2^e éd., Springer, 2009). Ce phénomène a également été démontré pour les essais dans un environnement d'hydrogène gazeux (T. Iijima, H. Enoki, J. Yamabe, B. An, « Effect of high-pressure gaseous hydrogen on fatigue properties of SUS304 and SUS316 austenitic stainless steel », PVP2018-84267, Proceedings of the ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Division Conference, Prague, République tchèque, 15-20 juillet 2018) ; cette étude montre par ailleurs que la résistance à

la fatigue dans l'hydrogène gazeux augmente à température élevée, jusqu'à 80 °C. Par conséquent, la température retenue pour les essais de résistance à la fatigue a été fixée à 293 ± 5 K, ce qui correspond à la température ambiante.

4. Argumentation concernant le paragraphe 222 : Prescriptions d'essai

218. Argumentation concernant la méthode des éprouvettes entaillées (option 1). La méthode des éprouvettes entaillées permet d'évaluer l'effet d'un cycle de contrainte correspondant à un cycle complet de ravitaillement. L'entaille évalue la sensibilité du matériau à une concentration de contrainte en présence d'hydrogène, ce qui offre une marge de sécurité par rapport au cas sans concentration de contrainte. La contrainte maximale appliquée pendant le cycle de chargement ($S_{\max} = 1/3$ de la résistance à la traction) est conforme aux limites de conception typiques pour les systèmes sous pression (par exemple ASME B31.12), tandis que la contrainte nominale minimale est égale à 10 % de cette valeur ($R = 0,1$). Le cycle de chargement est donc du type traction-traction, ce qui correspond aux contraintes nominales des systèmes sous pression. Le critère d'acceptation de la méthode des éprouvettes entaillées (> 100 000 cycles) vise à démontrer que la résistance à la fatigue du matériau soumis à des contraintes relativement élevées est nettement supérieure à la durée de vie nominale de l'application automobile.

219. Argumentation concernant la méthode des éprouvettes lisses (option 2). La méthode des éprouvettes lisses nécessite d'évaluer deux propriétés : la résistance à la fatigue et la limite d'élasticité en traction. La résistance à la fatigue est évaluée à l'aide d'un cycle de chargement traction-compression ; la contrainte nominale maximale appliquée ($S_{\max} = 1/3$ de la résistance à la traction) est conforme aux limites de conception typiques pour les systèmes sous pression (par exemple, ASME B31.12). Le cycle de chargement est purement alterné, ce qui signifie que $S_{\min} = -S_{\max}$ ($R = -1$). Ce cas ne correspond pas aux contraintes de traction des systèmes sous pression, mais offre une marge de sécurité car il est plus défavorable que les situations généralement observées. Le critère d'acceptation de la méthode des éprouvettes lisses (> 200 000 cycles) vise à démontrer que la limite de fatigue ne diminue pas en présence d'hydrogène gazeux à haute pression. L'essai de traction à faible vitesse de déformation vérifie l'observation générale selon laquelle la présence d'hydrogène n'affecte pas la limite d'élasticité. Cependant, dans un environnement d'hydrogène, la ductilité peut varier en fonction de la vitesse de déformation, pour laquelle on fixe donc une valeur maximale. La vitesse de déformation recommandée par la norme CSA/ANSI CHMC 1-2014 est de 10^{-5} s^{-1} tandis que la littérature recommande une vitesse de déformation $\leq 5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (H. Kobayashi, T. Yamada, H. Kobayashi, S. Matsuoka, « Criteria for selecting materials to be used for hydrogen refuelling station equipment », PVP2016-64033, Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Division Conference, Vancouver, Colombie-Britannique, Canada, 17-21 juillet 2016) ; c'est cette dernière valeur qui a été adoptée ici.

5. Procédure d'essai

220. Spécification du matériau

- a) Le matériau étudié doit être défini par une spécification – il peut s'agir d'une norme reconnue au niveau national ou une spécification propre à l'entreprise. La spécification du matériau doit inclure des prescriptions concernant les caractéristiques suivantes :
 - i) Les fourchettes de composition admissibles ;
 - ii) La limite minimale d'élasticité en traction (S_y) ;
 - iii) La résistance minimale à la traction (S_u) ;
 - iv) L'allongement minimal en traction (El).
- b) Le matériau doit être testé sous la forme du produit final dans la mesure du possible. Lorsque la géométrie du composant ne permet pas de prélever des éprouvettes, le matériau peut être testé sous la forme d'un produit semi-fini dont les propriétés mécaniques sont nominalelement équivalentes à celles du composant ;

- c) La vérification de la conformité du matériau à la spécification peut s'appuyer sur la certification du fabricant ou sur des essais équivalents effectués dans l'air à température ambiante. La résistance à la traction mesurée est notée S^* (valeur moyenne mesurée sur au moins deux éprouvettes à température ambiante ou issue des essais en usine), elle définit la contrainte maximale pour les essais de résistance à la fatigue ;
- d) Soudures et matériaux liés métallurgiquement :
- i) Lorsque des matériaux sont soudés (ou liés métallurgiquement) et que le joint résultant est exposé à l'hydrogène gazeux, les éprouvettes de soudure doivent être testées conjointement avec les matériaux de référence pour vérifier la compatibilité avec l'hydrogène ;
 - ii) Les soudures et les matériaux liés métallurgiquement doivent être définis par un descriptif de mode opératoire de soudage qui énonce la procédure d'assemblage ainsi que la composition et les caractéristiques minimales de traction (S_y , S_u et E_L) de la structure assemblée (par exemple, le métal soudé) ;
 - iii) Les éprouvettes doivent être prélevées sur la structure assemblée dans la mesure du possible. Dans le cas contraire, on peut préparer des joints représentatifs ;
 - iv) Les éprouvettes de soudure doivent être testées dans de l'hydrogène gazeux et doivent satisfaire aux prescriptions du descriptif de mode opératoire de soudage ainsi qu'aux prescriptions d'essai énoncées au paragraphe 222.

221. Conditions environnementales de l'essai

- a) Pureté du gaz
- i) La pureté de l'échantillon d'hydrogène gazeux provenant de la chambre d'essai (appelé échantillon de gaz prélevé) doit être contrôlée pour vérifier que la qualité du gaz est conforme aux exigences des normes de ravitaillement applicables ou aux valeurs du tableau 6 ;
 - ii) Si les concentrations en oxygène et en vapeur d'eau de trois échantillons de gaz prélevés consécutivement sont conformes aux valeurs maximales indiquées au tableau 6, l'intervalle maximal entre deux prélèvements peut être fixé à 12 mois. Si les échantillons de gaz ne sont pas conformes, si l'installation d'essai est modifiée, si la procédure de purge change ou si l'intervalle entre deux prélèvements dépasse 12 mois, il convient d'analyser trois échantillons de gaz prélevés consécutivement pour démontrer que l'installation et les procédures d'essai permettent de répondre aux exigences du tableau 6.

Tableau 6

Exigences de pureté de l'hydrogène gazeux (parties par million en volume, sauf indication contraire)

<i>Espèces chimiques</i>	<i>Exigences relatives au gaz source</i>	<i>Exigences relatives à l'échantillon de gaz prélevé</i>
H ₂	99,999 % minimum	–
O ₂	≤ 1	< 2
H ₂ O	≤ 3,5	< 10
CO + CO ₂	≤ 2	–

- b) Pression

L'essai en environnement d'hydrogène gazeux est effectué à une pression minimale de 125 % de la PSN.

- c) Température
 - i) La température de l'éprouvette pour l'essai de résistance à la fatigue dans l'hydrogène doit être de 293 ± 5 K ;
 - ii) La température de l'éprouvette pour l'essai de traction à faible vitesse de déformation (SSRT) dans l'hydrogène doit être de 228 ± 5 K.

222. Prescriptions d'essai

- a) Les prescriptions de la méthode des éprouvettes entaillées (option 1) ou de la méthode des éprouvettes lisses (option 2) doivent être satisfaites. Il n'est pas nécessaire de satisfaire aux prescriptions des deux méthodes.
- b) Méthode des éprouvettes entaillées (option 1)
 - i) Les éprouvettes entaillées doivent être mises à l'essai avec un coefficient de concentration de contrainte élastique (K_t) supérieur ou égal à 3. L'essai doit être effectué dans les conditions environnementales décrites au paragraphe 221 et porter au minimum sur trois éprouvettes.
 - a. Les essais de fatigue par force contrôlée doivent être effectués à amplitude constante conformément aux normes internationalement reconnues. La contrainte maximale appliquée pendant le cycle de chargement (S_{max}) doit être supérieure ou égale à 1/3 de la résistance moyenne à la traction mesurée à température ambiante dans l'air (S^*). La contrainte normale est définie comme la charge divisée par la section nette (c'est-à-dire la section transversale initiale minimale de l'éprouvette). Le rapport de charge (R) doit être égal à 0,1, avec $R = S_{min}/S_{max}$, S_{min} étant la contrainte normale minimale et S_{max} la contrainte normale maximale ;
 - b. La fréquence doit être inférieure ou égale à 1 Hz.
 - ii) Prescriptions concernant la méthode des éprouvettes entaillées :
 - a. Le nombre de cycles de fatigue (N) appliqués à chaque éprouvette doit être supérieur à 10^5 .
- c) Méthode des éprouvettes lisses (option 2)
 - i) Les éprouvettes lisses doivent être soumises à l'essai de fatigue conformément aux normes internationalement reconnues. L'essai doit être effectué dans les conditions environnementales décrites au paragraphe 221 et porter au minimum sur trois éprouvettes.
 - a. Les essais de fatigue par force contrôlée doivent être effectués à amplitude constante conformément aux normes internationalement reconnues. La contrainte maximale appliquée pendant le cycle de chargement (S_{max}) doit être supérieure ou égale à 1/3 de la résistance moyenne à la traction mesurée à température ambiante dans l'air (S^*). La contrainte normale est définie comme la charge divisée par la section nette (c'est-à-dire la section transversale initiale minimale de l'éprouvette). Le rapport de charge (R) doit être égal à -1 (cycle de charge purement alterné), avec $R = S_{min}/S_{max}$, S_{min} étant la contrainte normale minimale et S_{max} la contrainte normale maximale ;
 - b. La fréquence doit être inférieure ou égale à 1 Hz.

- ii) Les éprouvettes lisses doivent être soumises à l'essai de traction à faible vitesse de déformation conformément aux normes internationalement reconnues. L'essai doit être effectué dans les conditions environnementales décrites au paragraphe 221 et porter au minimum sur trois éprouvettes.
- a. L'allongement au cours de l'essai est mesuré sur la longueur entre repères de l'éprouvette (habituellement, cette longueur est ≥ 12 mm et égale à 3 à 5 fois le diamètre de l'éprouvette). Normalement, on fixe directement un extensomètre sur l'éprouvette, mais d'autres méthodes équivalentes sont acceptables. La vitesse de déformation mesurée (entre la limite d'élasticité et la résistance à la rupture) doit être $\leq 5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.
- iii) Prescriptions concernant la méthode des éprouvettes lisses :
- Le nombre de cycles de fatigue (N) appliqués à chaque éprouvette doit être supérieur à 2×10^5 .
- Pour l'essai de traction à faible vitesse de déformation, la limite d'élasticité mesurée doit être supérieure à 80 % de la limite d'élasticité mesurée dans l'air à la température définie au paragraphe 221.

223. Synthèse des prescriptions

- a) Le tableau 7 résume les prescriptions d'essai de la méthode des éprouvettes entaillées (option 1) et de la méthode des éprouvettes lisses (option 2).

Tableau 7

Synthèse des essais et des prescriptions concernant la compatibilité des matériaux avec l'hydrogène

		<i>Méthode des éprouvettes entaillées (option 1)</i>	<i>Méthode des éprouvettes lisses (option 2)</i>
Résistance à la fatigue	Conditions d'essai	Pression H ₂ = 125 % PSN	Pression H ₂ = 125 % PSN
		Température = 293 ± 5 K	Température = 293 ± 5 K
		Contrainte normale $\geq 1/3 \text{ S}^*$	Contrainte normale $\geq 1/3 \text{ S}^*$
		Fréquence = 1 Hz	Fréquence = 1 Hz
	Nombre d'essais	3	3
	Prescriptions d'essai	N > 10 ⁵	N > 2 x 10 ⁵
Essai de traction à faible vitesse de déformation	Conditions d'essai	Aucune	Pression H ₂ = 125 % PSN
			Température = 228 ± 5 K
			Vitesse de déformation $\leq 5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$
		Nombre d'essais	
	Prescriptions d'essai		Limite d'élasticité > 0,80 % de la limite d'élasticité dans l'air à la même température

N. Essai de fissuration par corrosion sous contrainte en présence de gaz humide pour les alliages d'aluminium

1. Introduction

224. Les systèmes de stockage et de confinement de l'hydrogène comprimé doivent être compatibles avec l'hydrogène gazeux sur la totalité des plages de pression et de température applicables. La fragilisation par l'hydrogène est un problème majeur pour les matériaux mis en œuvre dans ces systèmes. Les alliages d'aluminium présentent une bonne résistance à la fragilisation par l'hydrogène, on peut donc envisager de les utiliser. Cependant, certains types d'alliages d'aluminium sont sujets à la fissuration par corrosion sous contrainte en présence de gaz humide. Les différences entre les mécanismes de dissolution anodique et de fragilisation par l'hydrogène dans le processus de fissuration par corrosion sous contrainte en présence de gaz humide sont illustrées à la figure 39.

Figure 39

Mécanismes de fissuration par corrosion sous contrainte en présence de gaz humide

Type	Dissolution anodique	Fragilisation par l'hydrogène
Principe	<p>Corrosion électrochimique sous l'effet de l'eau salée</p>	<p>Corrosion sous contrainte par réaction entre Al et H₂O</p>
Réaction	<p>Réaction anodique : $Al \rightarrow Al^{3+} + 3 e^-$ Réaction cathodique : $O_2 + 2 H_2O + 4 e^- \rightarrow 4 OH^-$</p>	<p>$2Al + 3H_2O \rightarrow Al_2O_3 + 6H$</p>
Caractéristiques	<ul style="list-style-type: none"> Besoin d'oxygène et d'une solution Besoin de Cl⁻ (rupture du film passif) Ne se produit pas dans un environnement H₂ haute pression (pas d'oxygène et pas de solution) <p>⇒ Se produit uniquement à l'extérieur des réservoirs</p>	<ul style="list-style-type: none"> Se produit en présence de H₂O Propagation des fissures par accumulation d'atomes d'hydrogène au fond des fissures (sur la surface métallique fraîche), et non par dissolution ionique du métal <p>⇒ Se produit aussi bien à l'extérieur qu'à l'intérieur des réservoirs</p>
Évaluation	<p>Méthode d'essai actuelle appliquée par tous les équipementiers automobiles</p>	<p>※ Méthode d'essai de fissuration par corrosion sous contrainte en présence de gaz humide (essai de fissuration sous charge amélioré) proposée par le Japon pour le RTM ONU n° 13</p>

225. L'extérieur du réservoir est généralement exposé à l'humidité, et l'intérieur est en contact avec l'eau présente sous forme d'impureté dans l'hydrogène gazeux. Par conséquent, ce type de fissuration par corrosion sous contrainte se produit aussi bien à l'extérieur qu'à l'intérieur des réservoirs en présence d'eau. L'essai de propagation des fissures sous charge constante ou sous déplacement constant est destiné à démontrer que les matériaux présentent une résistance à la fissuration par corrosion sous contrainte adéquate pour les conditions d'utilisation prévues.

226. Ce type de fissures a d'abord été observé sur les bouteilles de plongée sous-marine. On a relevé sept accidents concernant des bouteilles de plongée en aluminium 6351 en Australie, en Nouvelle-Zélande et aux États-Unis d'Amérique ; il semble qu'ils résultent d'une fissuration par corrosion sous contrainte en présence de gaz humide. En conséquence, on a arrêté d'utiliser l'aluminium 6351 pour les bouteilles de plongée, et on l'a remplacé par l'aluminium 6061.

227. La sensibilité à la fissuration par corrosion sous contrainte en présence de gaz humide dépend de la composition chimique et des conditions de traitement thermique du matériau. L'aluminium 6351 et l'aluminium 6082, dont la composition chimique est similaire à celle de l'aluminium 6351, ont tous deux échoué à l'essai de fissuration par corrosion sous contrainte en présence de gaz humide énoncé dans la norme HPIS E 103:2018 (qui est dérivée de la norme ISO 7866).

228. En revanche, l'aluminium 6061 a subi avec succès l'essai selon la norme HPIS E103:2018. (G. Itoh, A. Kurumada, S. Aoshima et T. Ogawa, « Effect of alloying composition on humid-gas stress corrosion cracking behavior in Al-Mg-Si alloys », Proceedings of the 59th conference of metallurgists, COM2020, ISBN:978-1-926872-47-6, 2020). Cet essai permet de déterminer le degré de sensibilité des matériaux à la fissuration par corrosion sous contrainte en présence de gaz humide, et par conséquent d'élargir la gamme des matériaux qui pourront à l'avenir être utilisés pour le stockage d'hydrogène à haute pression.

2. Argumentation concernant la spécification du matériau

229. La présente section définit le matériau soumis à l'essai.

Spécification du matériau : Les matériaux soumis à l'essai sont des alliages d'aluminium. En général, les matériaux sont définis par une spécification, qui précise les fourchettes de composition ainsi que les caractéristiques en traction minimales (limite d'élasticité en traction S_y , résistance à la traction S_u et allongement en traction E_l). Les contraintes admissibles sont souvent déterminées à partir des caractéristiques de résistance minimales spécifiées, tandis que l'allongement fournit une évaluation qualitative de la détérioration non dangereuse. La vérification de la conformité du matériau à la spécification peut s'appuyer sur la certification en usine ou sur des essais effectués (ou sous-traités) par l'utilisateur. Les essais de vérification sont effectués en laboratoire. Aux fins de cette approche basée sur les performances, on suppose que les matériaux sont suffisamment peu sensibles à la variabilité, par exemple de composition.

3. Argumentation concernant les conditions environnementales et la durée de l'essai

230. La présente section définit les conditions environnementales de l'essai.

- a) *Température d'essai (par. 236 a)* : On considère généralement que la plage de fonctionnement du véhicule est comprise entre 233 K et 358 K (-40 °C et +85 °C). Bien que la sensibilité à la fissuration par corrosion sous contrainte à basse température soit faible, la température d'essai doit être la température ambiante ;
- b) *Atmosphère et humidité (par. 236 b)* : La fissuration par corrosion sous contrainte se propage par accumulation des atomes d'hydrogène générés par la réaction de l'eau sur l'aluminium au niveau des surfaces métalliques fraîches, comme le montre la figure 39. La fissuration par corrosion sous tension ne se produit pas en conditions sèches, l'humidité relative (HR) doit donc être supérieure à 85 % pendant la durée de l'essai. La présence d'eau de condensation sur l'éprouvette se traduit par une corrosion préférentielle pendant l'essai.
- c) *Durée de l'essai (par. 236 c)* : La durée de l'essai est de 90 jours, conformément à la section B6.6 de la norme ISO 7886:2012.

4. Argumentation concernant les prescriptions d'essai

231. *Éprouvettes (par. 237 a) et b)*. Les éprouvettes doivent être découpées dans des produits en alliage d'aluminium corroyé (plaques, produits extrudés et forgés). Il est recommandé d'utiliser des éprouvettes compactes ou des éprouvettes de flexion à simple entaille. La géométrie de ces éprouvettes est indiquée dans les normes ISO7539-6:2011 et ASTM E399-20a.

La largeur W et l'épaisseur B doivent être mesurées avec une précision de 0,1 % de W le long d'une ligne située dans une plage de 10 % de W de part et d'autre du plan de fissuration.

La face de l'éprouvette doit être traitée de manière à ce que la fissure soit détectable et sa longueur mesurable.

232. *Pré-fissuration par fatigue (par. 237 c)*. L'amorçage de la pré-fissuration par fatigue doit se faire à température et conditions atmosphériques ambiantes. La longueur effective de la fissure a , y compris la pré-fissure par fatigue, doit satisfaire à l'équation de petite déformation suivante, comme indiqué à la section B.5 de la norme ISO 7866:2012.

$$a, (W-a) \geq 1270(K_{IAPP}/\sigma_{0,2})^2$$

où :

a : longueur effective de la fissure (distance entre le fond de la pré-fissure par fatigue et l'axe de chargement (mm))

W : largeur nette réelle de l'éprouvette (mm)

K_{IAPP} : facteur d'intensité de contrainte d'une fissure lorsqu'une charge est appliquée à l'éprouvette ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)

233. *Charge appliquée et mesure (par. 237 d) et e)*. L'essai peut se faire sous charge constante ou sous déplacement constant, le premier mode étant cependant préférable au second. Cependant, il ne semble pas y avoir de différence entre les deux modes lorsque les fissures ne se propagent pas.

Si la charge contrôlée est inférieure à 95 % de la charge appliquée P , l'éprouvette doit être rejetée sans attendre la qualification finale du matériau. Des études menées par des chercheurs japonais montrent que l'extension de la fissure par corrosion sous contrainte en présence de gaz humide est supérieure à 0,16 mm lorsque la charge seuil diminue et devient inférieure à 95 % de la charge appliquée P .

234. *Critères d'acceptation (par. 239)*. L'extension de la fissure par corrosion sous contrainte en présence de gaz humide au cours de l'essai de 90 jours est comparée à la valeur seuil de 0,16 mm. Cette valeur correspond à une vitesse de propagation des fissures inférieure à 2×10^{-11} m/s, elle-même inférieure au critère général de fissuration par corrosion sous contrainte de 10^{-10} m/s.

5. Procédure d'essai

235. Spécification du matériau

- a) Le matériau est un alliage d'aluminium corroyé.
- b) Le matériau étudié doit être défini par une spécification – il peut s'agir d'une norme reconnue au niveau national ou une spécification propre à l'entreprise. La spécification du matériau doit inclure des prescriptions concernant les caractéristiques suivantes :
 - i) Les fourchettes de composition admissibles ;
 - ii) La limite minimale d'élasticité en traction, S_y ;
 - iii) La résistance minimale à la traction, S_u ;
 - iv) L'allongement minimal en traction, El .

- c) La vérification de la conformité du matériau à la spécification peut s'appuyer sur la certification du fabricant ou sur des essais équivalents effectués dans l'air à température ambiante. La limite d'élasticité conventionnelle mesurée de 0,2 % est notée $\sigma_{0,2}$ (valeur moyenne mesurée sur deux éprouvettes à température ambiante, conformément aux procédures de la norme ISO 6892-1:2019) et est utilisée pour l'amorçage de la préfissuration par fatigue.
236. Conditions environnementales et durée de l'essai
- a) Température : 298 ± 5 K pendant toute la durée de l'essai ;
- b) Atmosphère et humidité : pas de condensation, humidité relative (HR) de l'air supérieure ou égale à 85 % pendant toute la durée de l'essai ;
- c) Durée de l'essai : 90 jours, conformément à la section B6.6 de la norme ISO 7866:2012.
237. Prescriptions d'essai
- a) Éprouvette : L'une des géométries suivantes, ou une combinaison de celles-ci doit être utilisée pour l'essai :
- i) Éprouvette compacte selon la norme ISO 7539-6:2011 ;
- ii) Éprouvette de flexion à simple entaille (de type poutre encastree) selon la norme ISO 7539-6:2011 ;
- iii) Éprouvette de type double poutre pour flexion (DCB) selon la norme ISO 7539-6:2011 ;
- iv) Éprouvette à ouverture latérale par effet de coin modifiée (WOL modifiée) selon la norme ISO 7539-6:2011 ;
- v) Éprouvette en forme de C selon la norme ISO 7539-6:2011.
- b) Orientation de l'éprouvette : l'éprouvette doit être orientée selon les axes Y et X. D'autres orientations peuvent être ajoutées si nécessaire ;
- c) La préfissuration par fatigue doit être amorcée conformément à la classe 6 de la norme ISO 7539-6:2018 ;
- d) Une charge est appliquée sous charge constante ou sous déplacement constant :
- i) Sous charge constante, il est nécessaire d'utiliser une machine d'essai capable de contrôler la charge appliquée avec une précision de ± 1 %, comme défini au point 7.6.3 de la norme ISO 7539-6:2011 ;
- ii) Sous déplacement constant, la sensibilité de l'instrument de mesure ne doit pas être inférieure à 20 mV/mm afin de limiter l'amplification excessive des petits signaux. La linéarité de l'instrument de mesure doit être telle que l'écart par rapport aux déplacements réels ne doit pas dépasser 3 μm (0,003 mm) pour les petits déplacements jusqu'à 0,5 mm et ne doit pas dépasser 1 % des valeurs enregistrées pour les déplacements plus importants. Ces critères sont conformes au point 7.5.3 de la norme ISO 7539-6:2011 ;
- iii) La charge est égale à la valeur de K_{IAPP} obtenue à l'aide de l'équation suivante, comme indiqué à la section B.6.2 de la norme ISO 7866:2012 :
- $$K_{IAPP} = 0.056\sigma_{0,2}.$$
- e) Mesure de la charge : sous déplacement constant, la charge doit être mesurée par l'une des méthodes suivantes à l'issue de l'essai de 90 jours :
- i) Lorsque la charge n'est pas contrôlée :

- a. À la fin de l'essai, on mesure l'écartement des lèvres de la fissure, la charge étant toujours appliquée ;
 - b. On arrête d'appliquer la charge ;
 - c. On applique de nouveau la charge jusqu'à ce que l'écartement des lèvres de la fissure atteigne la valeur indiquée en a. en contrôlant la charge à l'aide d'un instrument de mesure.
- ii) Lorsque la charge est contrôlée, on mesure la charge à la fin de l'essai. Il est également acceptable de calculer la valeur de la charge à partir des valeurs de déformation élastique mesurées entre le début et la fin de l'essai.
- f) La post-fissuration et la rupture par fatigue doivent être amorcées comme suit :
- i) Sous charge constante, on amorce une post-fissuration par fatigue jusqu'à ce que la longueur de la fissure soit supérieure ou égale à 1 mm en appliquant une charge de fatigue équivalente à un facteur d'intensité de contrainte ne dépassant pas 0,6 fois la valeur de K_I obtenu sous charge ;
 - ii) Sous déplacement constant, on arrête d'appliquer la charge après l'avoir mesurée conformément à l'alinéa e) ci-dessus, puis on amorce une post-fissuration par fatigue jusqu'à ce que la longueur de la fissure soit supérieure ou égale à 1 mm en appliquant une charge de fatigue équivalente à un facteur d'intensité de contrainte ne dépassant pas 0,6 fois la valeur de K_I obtenu à l'alinéa e) ci-dessus.

L'essai doit se poursuivre jusqu'à la rupture de l'éprouvette. S'il est possible de repérer le plan de rupture par corrosion sous contrainte en présence de gaz humide, la rupture de l'éprouvette peut être réalisée par une méthode autre que l'amorçage d'une post-fissuration par fatigue ;

- g) Mesure de la longueur de la fissure : après rupture de l'éprouvette, on mesure les éléments suivants à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) ou d'autres instruments de mesure présentant une précision de $\pm 0,01$ mm :
- i) longueur effective de la fissure, y compris la préfissure de fatigue, a_{pre} ;
 - ii) longueur effective de la fissure jusqu'au fond de la fissure par corrosion sous contrainte en présence de gaz humide, a_{scc} ;

Trois mesures sont effectuées perpendiculairement au plan de rupture, en trois points correspondant à 25 %, 50 % et 75 % de l'épaisseur de l'éprouvette, et la valeur moyenne de ces trois mesures est retenue comme valeur de la longueur effective de la fissure a_{pre} ou a_{scc} .

238. Validité de l'essai

- a) Préfissure de fatigue : la différence entre la plus grande et la plus petite valeur de a_{pre} mesurée en trois points correspondant à 25 %, 50 % et 75 % de l'épaisseur de l'éprouvette doit être inférieure ou égale à 5 % de la largeur nette W de l'éprouvette ;
- b) Condition de petite déformation et de déformation plane : a , $(W-a)$ et B (épaisseur de l'éprouvette) doivent satisfaire à l'équation suivante, comme indiqué à la section B6.7 de la norme ISO 7866:2012 :

$$a, (W-a), B \geq 1270 (K_I/\sigma_{0,2})^2$$

Où a , $(W-a)$ et K_I sont définis comme suit :

- i) Sous charge constante : $a = a_{scc}$

$$(W-a) = (W - a_{scc})$$

$$K_I = K_{IAPP}$$

ii) Sous déplacement constant : $a = a_{pre}$

$$(W-a) = (W - a_{pre})$$

$$K_I = K_{IAPP}$$

c) Si les conditions d'essai énoncées aux points a) et b) ci-dessus ne sont pas remplies, l'essai est invalide.

239. Critères d'acceptation

L'applicabilité du matériau est évaluée comme suit :

- a) L'extension de la fissure par corrosion sous contrainte en présence de gaz humide ($a_{sc} - a_{pre}$) définie au paragraphe 238 est comparée à la valeur seuil de 0,16 mm ;
- b) La valeur réelle K_{IA} du facteur K_{IAPP} appliqué est calculée en fonction de a_{pre} et de la charge appliquée conformément au point d) i) du paragraphe 237 dans le cas d'un essai sous charge constante, et au point d) ii) du paragraphe 237 dans le cas d'un essai sous déplacement constant ;
- c) La validité du matériau est évaluée conformément au tableau 8 ci-dessous.

Tableau 8

Qualification du matériau

<i>Cas</i>	<i>Extension de la fissure</i>	<i>Comparaison de K_{IA} et K_{IAPP}</i>	<i>Décision</i>
I		$K_{IA} \geq K_{IAPP}$	Accepté
II	$(a_{sc} - a_{pre}) \leq 0,16 \text{ mm}$	$K_{IA} < K_{IAPP}$	Invalide
III	$(a_{sc} - a_{pre}) > 0,16 \text{ mm}$	$K_{IA} \leq K_{IAPP}$	Rejeté
IV		$K_{IA} > K_{IAPP}$	Invalide

Le matériau est évalué comme suit :

Accepté : Le matériau est considéré comme présentant une résistance à la fissuration par corrosion sous contrainte en présence de gaz humide suffisante pour une utilisation dans les réservoirs d'hydrogène comprimé, comme indiqué à la section B.7.3 de la norme ISO 7866:2012.

Rejeté : Le matériau est considéré comme inadapté pour une utilisation dans les réservoirs d'hydrogène comprimé.

Invalide : Le matériau ne peut pas être évalué dans ces conditions. Dans le cas II, il est recommandé de recommencer l'essai si K_{IA} est égal à K_{IAPP} ou supérieur à K_{IAPP} dans une certaine mesure.

Dans le cas IV, où K_{IA} est très supérieur à K_{IAPP} , il est recommandé de recommencer l'essai, car le matériau peut être accepté si K_{IA} est légèrement supérieur à K_{IAPP} .

d) Au moins trois éprouvettes valides doivent subir l'essai avec succès pour que le matériau soit accepté.

240. Synthèse des conditions d'essai et des prescriptions

Tableau 9
Synthèse des conditions d'essai et des prescriptions

<i>Charge</i>	<i>Charge constante ou déplacement constant</i>
Température	298 ± 5K
Atmosphère et humidité	Air, HR ≥ 85 %
Nombre d'éprouvettes	3 (valides)
Durée de l'essai	90 jours
Critères	$(a_{scc} - a_{pre}) \leq 0,16 \text{ mm}$ $K_{IA} \geq K_{IAPP}$

O. Tolérances indicatives pour les prescriptions de qualification du système de stockage d'hydrogène comprimé

1. Introduction

241. Le présent tableau de tolérance a été élaboré par un sous-groupe composé d'équipementiers, de fabricants de composants et de laboratoires d'essai. Il est basé sur ce qui est raisonnable du point de vue des essais, tout en respectant l'objectif des essais et en préservant la répétabilité interlaboratoire.

242. Les présentes valeurs de tolérance ne remplacent pas les valeurs plus strictes formulées par le fabricant. Elles sont strictement indicatives et doivent être utilisées comme lignes directrices.

243. Les tolérances des paramètres d'essai sont celles prévues dans les procédures d'essai de la section 6. Lorsque les limites de tolérance des paramètres d'essai ne sont pas définies de manière stricte (par exemple \geq ou \leq), des tolérances inférieures à la valeur maximale ou supérieures à la valeur minimale peuvent être choisies par le laboratoire d'essai ou recommandées par le fabricant.

244. Les tolérances figurant au tableau 10 sont données à titre indicatif afin de permettre au fabricant de procéder à des essais dans des conditions plus difficiles s'il le souhaite.

245. Ainsi, au paragraphe 6.2.3.5, l'essai de pression statique se déroule à une pression ≥ 125 % de la PSN. Dans ce cas, il y a un minimum, mais pas de maximum. Le laboratoire d'essai peut préciser une pression maximale. En l'absence de consignes du fabricant, on peut appliquer la tolérance indicative de 5 % figurant dans le tableau, ce qui donne une pression maximale égale à 130 % de la PSN.

De même, la température de l'épreuve d'étanchéité figurant à l'alinéa c) du paragraphe 6.2.6.1.8 est ≤ -40 °C. Aucune température minimale n'est définie, ce qui laisse au laboratoire d'essai la possibilité d'en choisir une. La tolérance indicative donnée dans le tableau est de 3 °C, la température minimale indicative est donc de -43 °C.

246. Dans certains cas, le paramètre d'essai est une valeur cible précise. Le tableau donne alors une plage de tolérance indicative sous la forme \pm . Ainsi, la hauteur de chute à l'horizontale indiquée au paragraphe 6.2.3.2. est de 1,8 m. Le laboratoire d'essais peut définir sa propre plage de tolérance à l'intérieur de la plage indicative de $\pm 0,02$ m figurant dans le tableau.

Tableau 10
Tolérances facultatives relatives aux paramètres d'essai

Paragraphe	Paramètre d'essai	Valeur	Tolérance indicative	Unité
<i>Pression</i>				
6.2.2 6.2.3 6.2.6	Pression cible	\geq ou \leq xx % de la PSN	5	% de la PSN
6.2.4	Pression cible	taux de charge \geq 100 %	5	% du taux de charge
6.2.4 6.2.6.1.1 6.2.6.1.3 c)	Pression pneumatique initiale	\leq 2 MPa	1	MPa
6.2.6.1.11 a) 6.2.6.2.6 a)	Pression d'exposition aux agents atmosphériques	2 MPa	+0,2/-0	MPa
6.2.6.2.3 b) i)	Pression du cycle après l'essai de battement	\leq 60 % de la PSN	60	% de la PSN
<i>Température</i>				
6.2.3 6.2.4	Température	\geq ou \leq xx °C	10	°C
6.2.6.1.1 6.2.6.1.3 a) c) d) 6.2.6.2.3 a) i) 6.2.6.2.3 a) iii)	Températures extrêmes des cycles de pression	\geq 85 °C \leq -40 °C	5	°C
6.2.6.1.8 6.2.6.2.2	Température de l'essai d'étanchéité	\geq 85 °C \leq -40 °C	3	°C
6.2.6.1.11 a) 6.2.6.2.6 a)	Température d'exposition aux agents atmosphériques	70 °C	\pm 1	°C
<i>Humidité</i>				
6.2.3.6. c) 6.2.4	Humidité de la phase chaude	HR \geq 80 %	20	% HR
6.2.6.1.4 6.2.6.2.4	Humidité de la phase de séchage	HR \leq 30 %	30	% HR
6.2.6.1.4 6.2.6.2.4	Humidité de la phase humide	HR = 100 %	+0/-20	% HR
6.2.6.1.4 6.2.6.2.4	Humidité de la phase sèche	HR \leq 30 %	30	% HR
<i>Durée</i>				
6.2.3.1	Durée de maintien de la pression d'épreuve	\geq 30 secondes	30	s
6.2.3.1	Durée de maintien de la pression d'épreuve en fin de vie	\geq 4 minutes	1	min
6.2.3.3 b) 6.2.4.2	Durée du conditionnement préalable à l'essai de choc au pendule Durée du conditionnement préalable à l'essai de perméation	12 h minimum	72	h

<i>Paragraphe</i>	<i>Paramètre d'essai</i>	<i>Valeur</i>	<i>Tolérance indicative</i>	<i>Unité</i>
6.2.3.4	Durée du conditionnement préalable à l'exposition aux agents chimiques	48 h minimum	2	h
6.2.3.5	Durée de l'essai de pression statique à haute température	1000 h minimum	72	h
6.2.6.1.3 a) 6.2.6.1.3 c)	Durée du cycle de température Durée du conditionnement préalable au cycle de pression	2 h minimum	72	h
6.2.6.1.4 6.2.6.2.4 6.2.6.1.5 a) 6.2.6.2.5 a)	Durée du cycle de corrosion accélérée Durée d'exposition au fluide	24 h	+2/-0	h
6.2.6.1.7 b) 6.2.6.2.8	Durée de l'essai de vibration	30 minutes	+1/-0	min
6.2.6.1.7 b) 6.2.6.2.8	Durée du balayage de la plage de fréquences	10 minutes	+1/-0	min
6.2.6.1.8 6.2.6.2.2	Durée du conditionnement préalable à l'essai d'étanchéité	1 h minimum	24	h
6.2.6.1.8 6.2.6.2.2	Durée d'immersion pour l'essai d'étanchéité	1 minute minimum	2	min
6.2.6.1.9 b)	Durée du conditionnement préalable à l'essai de déclenchement sur banc	2 minutes minimum	8	h
6.2.6.1.11 a) 6.2.6.2.6 a)	Durée d'exposition aux agents atmosphériques	96 h minimum	2	h
6.2.6.2.1 a)	Durée de maintien de la pression hydrostatique	3 minutes minimum	1	min
6.2.6.2.3 b) i)	Durée d'application du débit provoquant le battement	24 h minimum	1	h
6.2.6.2.7 a) i)	Durée de maintien pour le 1 ^{er} essai	1 h minimum	30	min
6.2.6.2.7 a) ii)	Durée de maintien pour le 2 ^e essai	1 minute minimum	5	s
6.2.6.2.7 b)	Durée d'application de la tension pour la mesure de la résistance d'isolement	2 secondes minimum	1	s
6.2.6.1.6 6.2.6.2.9	Durée d'exposition au brouillard d'ammoniac	10 jours minimum	2	h
<i>Vitesses</i>				
6.2.4.1 b)	Vitesse de montée en pression	supérieure ou égale à celles indiquées dans les tableaux de la norme SAEJ2601_2020 05	7	MPa/min

<i>Paragraphe</i>	<i>Paramètre d'essai</i>	<i>Valeur</i>	<i>Tolérance indicative</i>	<i>Unité</i>
6.2.4.1 d)	Vitesse de vidage	supérieure ou égale à la consommation instantanée maximale théorique du véhicule	-0/+100 % de la consommation instantanée maximale	g/s ou NI/min
6.2.4.1 d)	Vitesse de vidage	supérieure ou égale à la vitesse de vidage pendant la maintenance	-0/+100 % de la vitesse de vidage pendant la maintenance	g/s ou NI/min
<i>Tension</i>				
6.2.6.2.7 a) i)	Tension pour le 1 ^{er} essai	≥ 1,5 fois la tension nominale	0,5	V
6.2.6.2.7 a) ii)	Tension pour le 2 ^e essai	≥ 2 fois la tension nominale	0,5	V
6.2.6.2.7 b)	Tension appliquée pour la mesure de la résistance d'isolement	1 000 Vcc	±10	V
<i>Distance</i>				
6.2.3.2 a) i)	Hauteur de chute à l'horizontale	1,8 m	±0,02	m
6.2.3.2 a) ii) iii)	Hauteur de chute à la verticale	Hauteur de chute calculée	±0,02	m
6.2.3.2 a) iv)	Hauteur du centre de gravité (chute à 45°)	≤ 1,8 m	0,04	m
6.2.3.3 a)	Profondeur de la 1 ^{re} entaille	0,75 mm minimum	0,5	mm
6.2.3.3 a)	Longueur de la 1 ^{re} entaille	200 mm minimum	5	mm
6.2.3.3 a)	Profondeur de la 2 ^e entaille	1,25 mm minimum	0,5	mm
6.2.3.3 a)	Longueur de la 2 ^e entaille	25 mm minimum	1	mm
6.2.3.3 b)	Diamètres des zones d'impact du pendule	100 mm	±10	mm
6.2.3.3 b)	Rayon de courbure de l'élément de frappe du pendule	3 mm	±1	mm
6.2.6.1.7 a)	Hauteur de chute	≤ 2 m	0,05	m
<i>Concentration</i>				
6.2.3.4 a)	Acide sulfurique en solution aqueuse	19 % (en volume)	± 1	%
6.2.3.4 b)	Hydroxyde de sodium en solution aqueuse	25 % (en poids)	± 1	%
6.2.3.4 c)	Méthanol dilué dans de l'essence	5 % (en volume)	± 1	%
6.2.3.4 d)	Nitrate d'ammonium en solution aqueuse	28 % (en poids)	± 1	%
6.2.3.4 e)	Méthanol en solution aqueuse	50 % (en volume)	± 1	%

<i>Paragraphe</i>	<i>Paramètre d'essai</i>	<i>Valeur</i>	<i>Tolérance indicative</i>	<i>Unité</i>
6.2.6.1.4 a) 6.2.6.2.4 a)	Concentration en chlorure de sodium	0,9 % en poids	s.o.	s.o.
6.2.6.1.4 b) 6.2.6.2.4 b)	Concentration en chlorure de calcium	0,1 % en poids	s.o.	s.o.
6.2.6.1.4 c) 6.2.6.2.4 c)	Concentration en bicarbonate de sodium	0,075 % en poids	s.o.	s.o.
6.2.6.1.5 a) i) 6.2.6.2.5 a) i)	Acide sulfurique en solution aqueuse	19 % en volume	±1	%
6.2.6.1.5 a) ii) 6.2.6.2.5 a) ii)	Éthanol dilué dans de l'essence	10 % en volume	±1	%
6.2.6.1.5 a) iii) 6.2.6.2.5 a) iii)	Méthanol en solution aqueuse	50 % en volume	±1	%
6.2.6.1.6 6.2.6.2.9	Quantité de solution ammoniacale	≥ 2 % du volume de la chambre	2	ml/l
<i>Autres</i>				
6.2.3.2 a) iv)	Angle de la chute à 45°	45°	±5	°
6.2.3.3 b)	Énergie d'impact du pendule	≥ 30 J	5	J
6.2.6.1.6 6.2.6.2.9	Densité	0,94	±0,01	sans unité

».

Partie II, texte du Règlement, lire :

« II. Texte du Règlement

1. Objet

Le présent Règlement énonce les prescriptions de sécurité applicables aux véhicules à hydrogène. Il a pour objet de réduire au minimum les risques pour la santé humaine pouvant résulter d'un incendie, d'un éclatement ou d'une explosion du système d'alimentation en carburant du véhicule.

2. Domaine d'application

2.1. Le présent Règlement s'applique à tous les véhicules à hydrogène des catégories 1 et 2 dont la vitesse maximale par construction est supérieure à 25 km/h.

2.2. Les Parties contractantes peuvent exclure les véhicules suivants du champ d'application du présent Règlement :

- a) Les véhicules à quatre roues ou plus dont la masse à vide n'est pas supérieure à 350 kg, la masse des batteries de traction n'étant pas prise en compte, dont la vitesse maximale par construction ne dépasse pas 45 km/h, et dont la cylindrée et la puissance nominale continue maximale dans le cas des véhicules hybrides électriques ne dépasse pas 50 cm³ pour les moteurs à allumage commandé et 4 kW pour les moteurs électriques, respectivement ;
- b) Les véhicules à quatre roues ou plus, autres que ceux classés dans la catégorie a) ci-dessus, dont la masse à vide n'est pas supérieure à 450 kg (ou 650 kg pour les véhicules destinés au transport de marchandises), la masse des batteries de traction n'étant pas prise en compte, et dont la puissance nominale continue maximale ne dépasse pas 15 kW.

3. Définitions

Aux fins du présent Règlement, on entend par :

- 3.1 (libre)
- 3.2 (libre)
- 3.3 « *Disque de rupture* », la partie fonctionnelle non refermable d'un dispositif de décompression qui, lorsqu'elle est montée dans le dispositif, est conçue pour éclater à une valeur de pression prédéterminée pour évacuer l'hydrogène comprimé ;
- 3.4 « *Clapet antiretour* », un clapet qui évite le reflux de l'hydrogène ;
- 3.5 « *Concentration d'hydrogène* », le pourcentage de moles (ou molécules) d'hydrogène dans le mélange d'hydrogène et d'air (équivalent au volume partiel d'hydrogène gazeux) ;
- 3.6 « *Réservoir* » (de stockage d'hydrogène), le composant sous pression du véhicule qui stocke le volume primaire d'hydrogène carburant dans une seule chambre ou dans plusieurs chambres raccordées en permanence ;

- 3.7 « *Accessoires du réservoir* », les pièces non soumises à la pression qui sont fixées au réservoir, lui fournissent un appui ou une protection supplémentaire et ne peuvent être retirées que temporairement à des fins d'entretien ou d'inspection et à l'aide d'outils ;
- 3.8 « *Système de stockage d'hydrogène comprimé* », un système conçu pour stocker l'hydrogène comprimé alimentant un véhicule à hydrogène et composé d'un réservoir, éventuellement muni d'accessoires, et de tous les dispositifs de fermeture primaire qui sont nécessaires pour isoler l'hydrogène stocké du reste du système d'alimentation en carburant et du milieu ambiant ;
- 3.9 « *Date de retrait du service* », la date (mois et année) spécifiée pour le retrait du service ;
- 3.10 « *Date de fabrication* » (d'un réservoir à hydrogène comprimé), la date (mois et année) de l'essai de pression d'épreuve ou de l'essai de contrôle final effectué par le fabricant ;
- 3.11 (libre)
- 3.12 « *Espaces fermés ou semi-fermés* », les volumes se trouvant à l'intérieur du véhicule (ou du contour du véhicule traversant des ouvertures), mais qui sont extérieurs au système hydrogène (système de stockage, système de pile à combustible, moteur à combustion interne et système de gestion du débit) et le cas échéant à ses logements, dans lesquels l'hydrogène peut s'accumuler et présenter ainsi un danger ;
- 3.13 (libre)
- 3.14 (libre)
- 3.15 « *Chaîne de traction électrique* », l'ensemble du circuit électrique pouvant comprendre le ou les moteurs de traction et pouvant aussi comprendre le système rechargeable de stockage de l'énergie électrique (SRSEE), le système de conversion de l'énergie électrique, les convertisseurs électroniques, les moteurs de traction, le faisceau de câblage et les connecteurs, et le système de raccordement pour la recharge du SRSEE ;
- 3.16 (libre)
- 3.17 (libre)
- 3.18 (libre)
- 3.19 (libre)
- 3.20 (libre)
- 3.21 (libre)
- 3.22 (libre)
- 3.23 (libre)
- 3.24 « *Système de pile à combustible* », un système comprenant la ou les piles à combustible, le système de traitement de l'air, le système de commande du débit de carburant, le système d'échappement, le système de régulation thermique et le système d'évacuation de l'eau ;
- 3.25 « *Embout de remplissage* », l'accessoire permettant de raccorder la buse de ravitaillement de la station de distribution au véhicule et à travers lequel le carburant est transféré dans le véhicule. L'embout de remplissage est utilisé comme substitut à un raccord de remplissage ;
- 3.26 « *À haute tension* », la classification d'un composant ou d'un circuit électrique dont la tension de fonctionnement maximale est $> 60 \text{ V}$ et $\leq 1\,500 \text{ V}$ en courant continu ou $> 30 \text{ V}$ et $\leq 1\,000 \text{ V}$ en courant alternatif ;

- 3.27 « *Rail haute tension* », le circuit électrique, y compris le système de raccordement pour la recharge du SRSEE qui fonctionne sous haute tension ;
- 3.28 « *Véhicule à hydrogène* », tout véhicule à moteur qui utilise comme moyen de propulsion de l'hydrogène gazeux comprimé ou de l'hydrogène liquéfié, y compris les véhicules à pile à combustible et à moteur à combustion interne. L'hydrogène servant de carburant à ces véhicules est défini dans les normes ISO 14687:2019 et SAE J2719_202003 ;
- 3.29 (libre)
- 3.30 (libre)
- 3.31 (libre)
- 3.32 « *Compartiment à bagages* », l'espace réservé aux bagages ou aux marchandises sur le véhicule, séparé de l'habitacle par la cloison avant ou la cloison arrière et délimité par le pavillon, le capot, le plancher et les parois latérales ;
- 3.33 « *Système de stockage d'hydrogène liquéfié* », le ou les réservoirs de stockage d'hydrogène liquéfié, les dispositifs de décompression (PRD), le dispositif d'arrêt, le système de gestion des évaporats et les tuyauteries de raccordement (s'il en existe) et les raccords entre les composants précités ;
- 3.34 « *Limite inférieure d'inflammabilité (LII)* », la plus basse concentration de carburant à laquelle un mélange de carburants gazeux est inflammable à température et pression normales. La limite inférieure d'inflammabilité pour l'hydrogène gazeux dans l'air a été fixée de manière prudente à 4 % en volume en environnement inerte (par. 130 de la partie I) ;
- 3.35 « *Pression de service maximale admissible (PSMA)* », la plus haute pression manométrique à laquelle un réservoir ou un système de stockage d'hydrogène est autorisé à fonctionner en conditions d'utilisation normales ;
- 3.36 « *Pression maximale de remplissage (PMR)* », la pression maximale appliquée à un système de stockage d'hydrogène comprimé au cours du remplissage. La pression maximale de remplissage est égale à 125 % de la pression de service nominale ;
- 3.37 « *Pression de service nominale (PSN)* », la pression manométrique qui caractérise les conditions d'utilisation typiques d'un système. Dans le cas des systèmes de stockage d'hydrogène comprimé, la PSN est la pression stabilisée du gaz comprimé à une température uniforme de 15 °C dans un réservoir plein ;
- 3.38 (libre)
- 3.39 (libre)
- 3.40 « *Habitacle* », l'espace destiné aux occupants, qui est délimité par le pavillon, le plancher, les parois latérales, les portes, les vitres extérieures, la cloison avant et la cloison arrière ou le hayon arrière ;
- 3.41 « *Dispositif de décompression (PRD)* », un dispositif qui, lorsqu'il se déclenche dans des conditions de fonctionnement prédéterminées, permet d'évacuer l'hydrogène contenu dans un système sous pression et évite ainsi une défaillance du système ;
- 3.42 « *Soupape de surpression* », un dispositif de décompression qui s'ouvre lorsque la pression atteint une valeur prédéterminée et qui peut se refermer ;
- 3.43 (libre)
- 3.44 (libre)

- 3.45 « *Système rechargeable de stockage de l'énergie électrique (SRSEE)* », le système rechargeable de stockage de l'énergie qui alimente le système de propulsion électrique ;
- 3.46 « *Rupture* » ou « *éclatement* », les deux termes qui s'appliquent lorsqu'une enveloppe se dissocie, s'ouvre ou se rompt en pièces soudainement et violemment sous la force de la pression interne ;
- 3.47 (libre)
- 3.48 « *Durée de service* » (d'un réservoir d'hydrogène comprimé), la période de temps pendant laquelle le service (l'utilisation) est autorisé(e) ;
- 3.49 « *Vanne d'arrêt* », une vanne située entre le réservoir et le système d'alimentation en carburant du véhicule, qui est par défaut en position fermée en l'absence d'alimentation électrique ;
- 3.50 « *Défaillance unique* », une défaillance causée par un événement unique, y compris toute défaillance résultant de cette défaillance ;
- 3.51 « *Flux thermique surfacique (HRR/A)* », le flux de chaleur par unité de surface du brûleur, qui est fonction du débit de combustible multiplié par le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du combustible. Il est approprié d'utiliser le PCI pour caractériser les incendies de véhicules, car l'eau issue de la combustion reste sous forme de vapeur. Le PCI du GPL est d'environ 46 MJ/kg, mais il doit être déterminé sur chaque site en tenant compte de la composition réelle du combustible.
- 3.52 « *Taux de charge* », le rapport entre la densité de l'hydrogène dans les conditions réelles de température et de pression du système de stockage d'hydrogène comprimé et à 15 °C à la pression de service nominale. Il s'exprime en pourcentage et se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Taux de charge (\%)} = \frac{\rho(P, T)}{\rho(PSN, 15\text{ °C})} \times 100$$

La densité de l'hydrogène à différentes pressions et températures est indiquée dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1
Densité de l'hydrogène comprimé (g/l)

Température °C	Pression (MPa)												
	1	10	20	30	35	40	50	60	65	70	75	80	87,5
-40	1,0	9,7	18,1	25,4	28,6	31,7	37,2	42,1	44,3	46,1	48,4	50,3	53,0
-30	1,0	9,4	17,5	24,5	27,7	30,6	36,0	40,8	43,0	45,1	47,1	49,0	51,7
-20	1,0	9,0	16,8	23,7	26,8	29,7	35,0	39,7	41,9	43,9	45,9	47,8	50,4
-10	0,9	8,7	16,2	22,9	25,9	28,7	33,9	38,6	40,7	42,8	44,7	46,6	49,2
0	0,9	8,4	15,7	22,2	25,1	27,9	33,0	37,6	39,7	41,7	43,6	45,5	48,1
10	0,9	8,1	15,2	21,5	24,4	27,1	32,1	36,6	38,7	40,7	42,6	44,4	47,0
15	0,8	7,9	14,9	21,2	24,0	26,7	31,7	36,1	38,2	40,2	42,1	43,9	46,5
20	0,8	7,8	14,7	20,8	23,7	26,3	31,2	35,7	37,7	39,7	41,6	43,4	46,0
30	0,8	7,6	14,3	20,3	23,0	25,6	30,4	34,8	36,8	38,8	40,6	42,4	45,0
40	0,8	7,3	13,9	19,7	22,4	24,9	29,7	34,0	36,0	37,9	39,7	41,5	44,0
50	0,7	7,1	13,5	19,2	21,8	24,3	28,9	33,2	35,2	37,1	38,9	40,6	43,1
60	0,7	6,9	13,1	18,7	21,2	23,7	28,3	32,4	34,4	36,3	38,1	39,8	42,3
70	0,7	6,7	12,7	18,2	20,7	23,1	27,6	31,7	33,6	35,5	37,3	39,0	41,4
80	0,7	6,5	12,4	17,7	20,2	22,6	27,0	31,0	32,9	34,7	36,5	38,2	40,6
85	0,7	6,4	12,2	17,5	20,0	22,3	26,7	30,7	32,6	34,4	36,1	37,8	40,2

- 3.53 « *Dispositif de décompression thermocommandé (TPRD)* », un dispositif de décompression non refermable, activé par la chaleur, qui s'ouvre pour évacuer l'hydrogène gazeux ;

- 3.54 « *Système d'alimentation en carburant* », un ensemble de composants permettant de stocker de l'hydrogène carburant et d'alimenter une pile à combustible ou un moteur à combustion interne.

4. Applicabilité des prescriptions

- 4.1 Les prescriptions de la section 5 (voir les conditions et les procédures d'essai de la section 6) s'appliquent à tous les véhicules à hydrogène comprimé des deux classes de masse suivantes s'il y a lieu :

- a) Voitures particulières et utilitaires légers : Véhicules de la catégorie 1-1 et véhicules des catégories 1-2 et 2 dont le PTC est inférieur ou égal à la valeur seuil ;
- b) Véhicules utilitaires lourds : Véhicules des catégories 1-2 et 2 dont le PTC est supérieur à la valeur seuil.

Chaque Partie contractante peut décider de fixer à 3 500 kg ou 4 536 kg la valeur seuil applicable dans son règlement national ou régional³.

À la section 5 et à la section 6, les différences entre les dispositions applicables aux voitures particulières et utilitaires légers et celles applicables aux véhicules utilitaires lourds sont indiquées.

- 4.2 Les Parties contractantes peuvent continuer à effectuer les essais de choc prévus par leurs réglementations nationales (essais de choc avant, de choc latéral, de choc arrière et essai de retournement) et doivent respecter les valeurs limites énoncées au paragraphe 5.2.2.
- 4.3 Les prescriptions du RTM ONU n° 20 s'appliquent à tous les véhicules à hydrogène équipés d'une chaîne de traction électrique comprenant un rail haute tension.

5. Prescriptions fonctionnelles

- 5.1 Système de stockage d'hydrogène comprimé

La présente section contient les prescriptions visant à garantir l'intégrité du système de stockage d'hydrogène comprimé.

- a) Les dispositifs de fermeture primaire, qui peuvent être associés, sont les suivants :
 - i) Dispositif de décompression thermocommandé (TPRD) ;
 - ii) Clapet antiretour ;
 - iii) Vanne d'arrêt.
- b) Les Parties contractantes qui le souhaitent peuvent exiger que les dispositifs de fermeture primaire soient montés directement sur ou à l'intérieur de chaque réservoir ;
- c) Les systèmes de stockage d'hydrogène comprimé doivent satisfaire aux prescriptions en matière d'essais fonctionnels résumées dans le tableau 2. Les procédures d'essai correspondantes sont décrites à la section 6.

³ Aux fins de l'application du présent RTM ONU aux Règlements ONU, la valeur seuil est fixée à 3 500 kg, de sorte que la classe Voitures particulières et utilitaires légers comprend les catégories M₁, M₂ ayant un PTC inférieur ou égal à 3 500 kg et N₁, tandis que la classe Véhicules utilitaires lourds comprend les catégories M₂ ayant un PTC supérieur à 3 500 kg, M₃, N₂ et N₃.

Tableau 2

Synthèse des prescriptions applicables aux essais de qualification

<i>Section énonçant les prescriptions</i>	<i>Article soumis à l'essai</i>
5.1.1 Essais de vérification des caractéristiques de référence	Réservoir ou réservoir et ses accessoires, selon le cas
5.1.2 Essais de vérification de la durabilité	Réservoir ou réservoir et ses accessoires, selon le cas
5.1.3 Essais de vérification des caractéristiques attendues en utilisation sur route	Système de stockage d'hydrogène comprimé
5.1.4 Essai de vérification du comportement au feu : feu localisé/enveloppant (conditions justifiant le retrait du service)	Système de stockage d'hydrogène comprimé
5.1.5 Essai de vérification de la durabilité des dispositifs de fermeture primaire	Dispositifs de fermeture primaire

Tous les nouveaux systèmes de stockage d'hydrogène comprimé destinés aux véhicules routiers doivent avoir une PSN inférieure ou égale à 70 MPa.

La durée de vie du système de stockage d'hydrogène comprimé est déterminée par le fabricant, qui fixe la date de retrait du service en tenant compte des prescriptions fonctionnelles appliquées sur le marché concerné.

5.1.1 Essais de vérification des caractéristiques de référence

5.1.1.1 Pression d'éclatement initiale de référence

Trois (3) réservoirs neufs prélevés au hasard dans un lot de qualification comprenant au moins 10 unités sont soumis à une pression hydraulique jusqu'à éclatement conformément aux dispositions du paragraphe 6.2.2.1. Les éventuels accessoires du réservoir doivent également être soumis à cet essai, à moins que le fabricant ne puisse démontrer que les accessoires n'influent pas sur les résultats de l'essai et ne sont pas affectés par la procédure d'essai. Le fabricant doit fournir la documentation nécessaire (mesures et analyses statistiques) permettant de déterminer la valeur médiane de la pression d'éclatement des réservoirs neufs (pression d'éclatement initiale BP_0).

La pression d'éclatement de tous les réservoirs soumis à l'essai doit se situer dans la plage $BP_0 \pm 10\%$ et être supérieure ou égale à une pression d'éclatement minimale BP_{min} égale à 200 % de la PSN. Toutefois, les Parties contractantes qui le souhaitent peuvent maintenir la valeur de BP_{min} à 225 % de la PSN pour les réservoirs dont la PSN est inférieure ou égale à 35 MPa.

La pression d'éclatement minimale des réservoirs composites en fibres de verre doit être supérieure à 350 % de la PSN.

5.1.1.2 Résistance aux cycles de pression (nombre minimal de cycles)

Trois (3) réservoirs neufs prélevés au hasard dans le lot de qualification sont soumis à des cycles de pression hydraulique ; ils doivent résister à l'éclatement pendant 22 000 cycles, l'essai s'arrête en cas de perte d'étanchéité conformément aux dispositions du paragraphe 6.2.2.2. Les éventuels accessoires du réservoir doivent également être soumis à cet essai, à moins que le fabricant ne puisse démontrer que les accessoires n'influent pas sur les résultats de l'essai et ne sont pas affectés par la procédure d'essai. La perte d'étanchéité ne doit pas survenir avant 7 500 ou 11 000 cycles pour les voitures particulières et utilitaires légers, au choix des Parties contractantes, et 11 000 cycles pour les véhicules utilitaires lourds.

5.1.2 Essais de vérification de la durabilité (essais hydrauliques séquentiels)

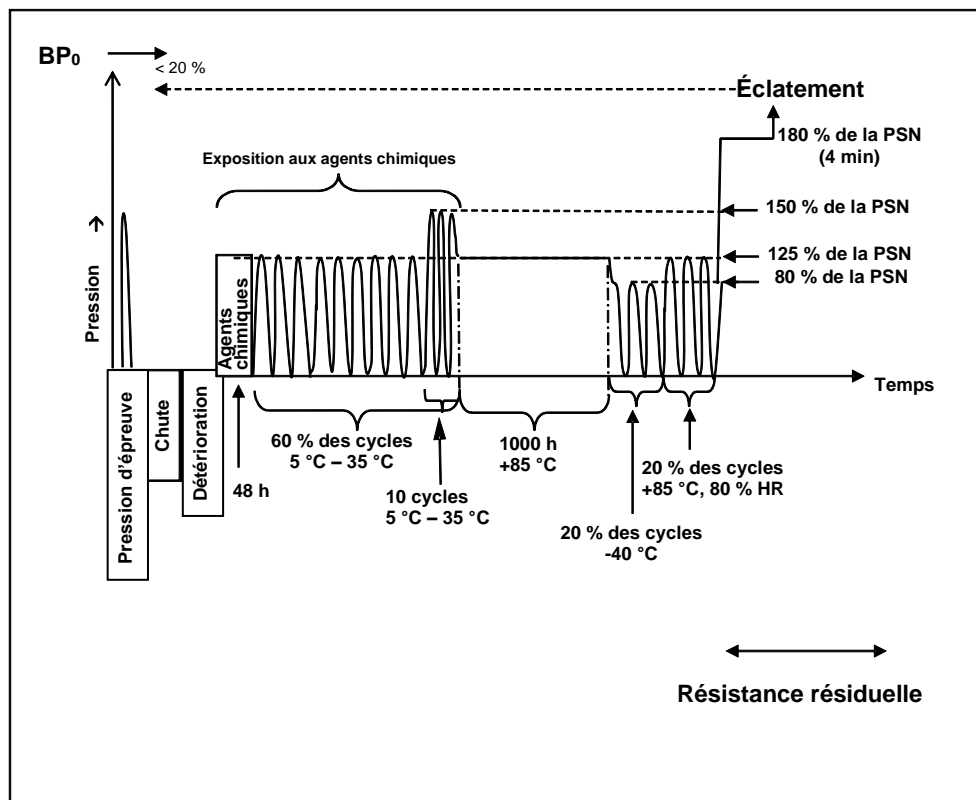
Si le nombre de cycles avant perte d'étanchéité des trois réservoirs mentionnés au paragraphe 5.1.1.2 est supérieur à 11 000 ou si toutes les valeurs mesurées sont comprises dans une fourchette de $\pm 25\%$ les unes par rapport aux autres, un seul (1) réservoir est soumis aux essais du présent paragraphe ; dans le cas contraire, trois (3) réservoirs sont soumis aux essais du présent paragraphe.

Sauf indication contraire, les essais du paragraphe 5.1.2. doivent être effectués sur le réservoir équipé de ses éventuels accessoires qui constitue le système de stockage d'hydrogène comprimé sans les dispositifs de fermeture primaire.

Le réservoir ne doit présenter aucune fuite pendant les essais décrits à la figure 1 ; ces essais sont menés de manière séquentielle sur un seul et même réservoir. Au moins un réservoir prélevé dans le lot de qualification doit être soumis aux essais pour démontrer ses caractéristiques. Les procédures d'essai applicables sont définies en détail au paragraphe 6.2.3.

Figure 1

Essai de vérification de la durabilité (essais hydrauliques séquentiels)



5.1.2.1 Essai de pression d'épreuve

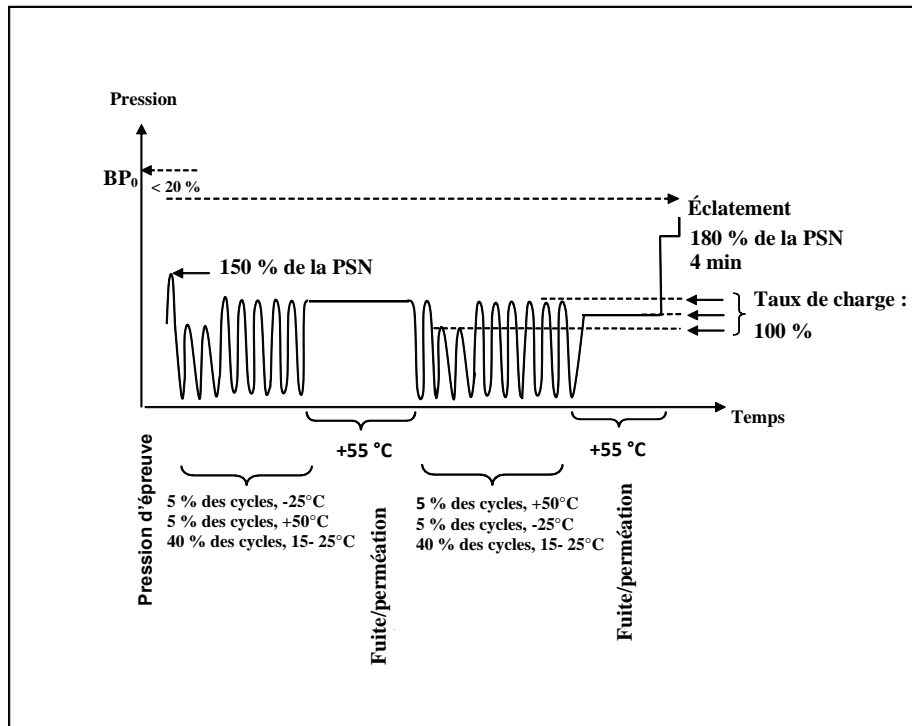
Le réservoir est mis sous pression conformément aux dispositions du paragraphe 6.2.3.1. Les éventuels accessoires du réservoir doivent également être soumis à cet essai, à moins que le fabricant ne puisse démontrer que les accessoires n'influencent pas sur les résultats de l'essai et ne sont pas affectés par la procédure d'essai. Les réservoirs qui ont subi un essai de pression d'épreuve en usine sont dispensés du présent essai.

5.1.2.2 Essai de chute (choc)

Le réservoir muni de ses éventuels accessoires est soumis à une chute selon l'une quelconque des orientations indiquées au paragraphe 6.2.3.2.

- 5.1.2.3 Essai de détérioration de la surface
Le réservoir muni de ses éventuels accessoires est soumis à l'essai de détérioration de la surface décrit au paragraphe 6.2.3.3. Les réservoirs en métal sont dispensés de la partie de l'essai portant sur l'entaillage de la surface.
- 5.1.2.4 Essai de cycles de pression à température ambiante avec exposition aux agents chimiques
Le réservoir muni de ses éventuels accessoires est préalablement exposé aux agents chimiques présents dans l'environnement routier puis soumis à des cycles de pression conformément aux dispositions du paragraphe 6.2.3.4.
- 5.1.2.5 Essai de pression statique à haute température
Le réservoir muni de ses éventuels accessoires est mis sous pression conformément aux dispositions du paragraphe 6.2.3.5.
- 5.1.2.6 Essai de cycles de pression à des températures extrêmes
Le réservoir muni de ses éventuels accessoires est soumis à des cycles de pression conformément aux dispositions du paragraphe 6.2.3.6.
- 5.1.2.7 Pression d'épreuve en fin de vie
Le réservoir muni de ses éventuels accessoires est mis sous pression conformément aux dispositions du paragraphe 6.2.3.1.
- 5.1.2.8 Essai de résistance résiduelle à l'éclatement
Le réservoir muni de ses éventuels accessoires est soumis à une pression hydraulique jusqu'à éclatement. La pression d'éclatement mesurée conformément à la procédure décrite au paragraphe 6.2.2.1 doit être supérieure ou égale à 80 % de la BP₀ déterminée à partir des données constructeur au paragraphe 5.1.1.1.
- 5.1.3 Essais de vérification des caractéristiques attendues en utilisation sur route (essais pneumatiques séquentiels)
Le système de stockage d'hydrogène comprimé est soumis aux essais séquentiels illustrés à la figure 2 ci-dessous. Les procédures d'essai applicables aux systèmes de stockage d'hydrogène comprimé sont décrites au paragraphe 6.2.4.
Pendant le test, le système de stockage d'hydrogène comprimé ne doit pas présenter de fuite et les dispositifs de fermeture primaire doivent rester fonctionnels.

Figure 2
**Essai de vérification des caractéristiques attendues en utilisation sur route
 (essais pneumatiques)**



5.1.3.1 Essai de pression d'épreuve

Le réservoir du système de stockage d'hydrogène comprimé est mis sous pression conformément aux dispositions du paragraphe 6.2.3.1.-Les éventuels accessoires du réservoir doivent également être soumis à cet essai, à moins que le fabricant ne puisse démontrer que les accessoires n'influent pas sur les résultats de l'essai et ne sont pas affectés par la procédure d'essai. Les réservoirs qui ont subi un essai de pression d'épreuve en usine sont dispensés du présent essai.

5.1.3.2 Essai de cycles de pression à températures ambiantes et extrêmes (essais pneumatiques)

Le système de stockage d'hydrogène comprimé est mis sous pression conformément aux dispositions du paragraphe 6.2.4.1.

5.1.3.3 Essais de fuite/perméation sous pression statique à des températures extrêmes (essais pneumatiques)

L'essai doit être mené conformément aux dispositions des paragraphes 6.2.4.2 et 6.2.4.3.

Le débit de fuite/perméation maximal admissible du système de stockage d'hydrogène comprimé est de 46 ml/h/l de capacité en eau du système.

En cas de fuite externe localisée, le débit de fuite mesuré conformément aux dispositions du paragraphe 6.2.4.3 doit être inférieur.

5.1.3.4 Pression d'épreuve en fin de vie (essai hydraulique)

Le réservoir muni de ses éventuels accessoires est mis sous pression conformément aux dispositions du paragraphe 6.2.3.1.

- 5.1.3.5 Essai de résistance résiduelle à l'éclatement (essai hydraulique)
- Le réservoir muni de ses éventuels accessoires est soumis à une pression hydraulique jusqu'à éclatement. La pression d'éclatement mesurée conformément à la procédure décrite au paragraphe 6.2.2.1 doit être supérieure ou égale à 80 % de la BP_O déterminée à partir des données constructeur au paragraphe 5.1.1.1).
- 5.1.4 Essai de vérification du comportement au feu : feu localisé/enveloppant (conditions justifiant le retrait du service)
- Le système de stockage d'hydrogène comprimé est soumis à l'essai de feu localisé/enveloppant en deux phases défini au paragraphe 6.2.5.
- Pendant cet essai, le taux de charge du système de stockage est de 100 %, le gaz d'essai étant l'hydrogène. La pression dans le système de stockage d'hydrogène comprimé doit retomber à moins de 1 MPa dans un délai maximal d'une heure pour les voitures particulières et utilitaires légers ou de deux heures pour les véhicules utilitaires lourds. En cas de déclenchement des TPRD, l'évacuation du gaz doit être continue. Le réservoir doit résister à l'éclatement pendant l'essai au feu. À l'exception du gaz libéré par les TPRD, les rejets résultant d'une fuite, de la perméation ou de l'évacuation du gaz à travers les parois ou les joints du réservoir ou d'autres composants ne doivent pas provoquer de jets de flamme de plus de 0,5 m.
- Si la pression dans le système de stockage d'hydrogène comprimé n'est pas retombée à moins de 1 MPa dans les délais prescrits, l'essai est arrêté et on considère que le système de stockage ne satisfait pas aux critères de l'essai (même s'il a résisté à l'éclatement).
- 5.1.5 Essai de vérification de la durabilité des dispositifs de fermeture primaire
- Les dispositifs de fermeture primaire du système de stockage d'hydrogène comprimé (TPRD, clapet antiretour et vanne d'arrêt prescrits au paragraphe 5.1) doivent respecter les prescriptions énoncées dans le reste du présent paragraphe.
- 5.1.5.1 Prescriptions de qualification des dispositifs de décompression thermocommandés
- Les dispositifs de décompression thermocommandés doivent satisfaire aux prescriptions de qualification ci-dessous :
- a) Essai de cycles de pression (par. 6.2.6.1.1) ;
 - b) Essai de vieillissement accéléré (par. 6.2.6.1.2) ;
 - c) Essai de cycles de température (par. 6.2.6.1.3) ;
 - d) Essai de résistance à la corrosion saline (par. 6.2.6.1.4) ;
 - e) Essai d'exposition aux agents chimiques présents dans l'environnement routier (par. 6.2.6.1.5) ;
 - f) Essai de fissuration par corrosion sous contrainte (par. 6.2.6.1.6) ;
 - g) Essai de chute et de vibration (par. 6.2.6.1.7) ;
 - h) Essai d'étanchéité (par. 6.2.6.1.8) ;
 - i) Essai de déclenchement sur banc (par. 6.2.6.1.9) ;
 - j) Essai de débit (par. 6.2.6.1.10) ;
 - k) Essai d'exposition aux agents atmosphériques (par. 6.2.6.1.11).

5.1.5.2 Prescriptions de qualification applicables aux clapets antiretour et aux vannes d'arrêt

Ces dispositifs doivent satisfaire aux prescriptions ci-dessous :

- a) Essai de résistance hydrostatique (par. 6.2.6.2.1) ;
- b) Essai d'étanchéité (par. 6.2.6.2.2) ;
- c) Essai de cycles de pression à des températures extrêmes (par. 6.2.6.2.3) ;
- d) Essai de résistance à la corrosion saline (par. 6.2.6.2.4) ;
- e) Essai d'exposition aux agents chimiques présents dans l'environnement routier (par. 6.2.6.2.5) ;
- f) Essai d'exposition aux agents atmosphériques (par. 6.2.6.2.6) ;
- g) Essais électriques (par. 6.2.6.2.7) ;
- h) Essai de vibration (par. 6.2.6.2.8) ;
- i) Essai de fissuration par corrosion sous contrainte (par. 6.2.6.2.9) ;

5.1.6 Étiquetage

Une étiquette doit être fixée de façon permanente sur chaque réservoir ou accessoire et contenir au moins les renseignements suivants : nom du fabricant, numéro de série, date de la fabrication, PSN, type de carburant, date de retrait du service et nombre de cycles effectués lors de l'essai défini au paragraphe 5.1.1.2. Les étiquettes apposées conformément au présent paragraphe doivent rester en place et être lisibles pendant la durée de service recommandée par le fabricant.

Les Parties contractantes qui le souhaitent peuvent fixer une durée de service maximale telle que la date de retrait du service ne soit pas postérieure de plus de 25 ans à la date de fabrication.

5.2 Système d'alimentation en carburant du véhicule

On trouvera ci-après les prescriptions relatives au système d'alimentation en carburant du véhicule, qui comprend le système de stockage d'hydrogène comprimé, les tuyauteries, les raccords et les composants contenant de l'hydrogène.

5.2.1 Intégrité du système d'alimentation en carburant en utilisation normale

5.2.1.1 Prescriptions concernant l'embout de remplissage

5.2.1.1.1 L'embout de remplissage évite le reflux de l'hydrogène comprimé et empêche qu'il ne s'échappe dans l'atmosphère. La vérification se fait selon la procédure d'essai d'étanchéité décrite au paragraphe 6.2.6.2.2.

5.2.1.1.2 Une étiquette doit être apposée à proximité de l'embout de remplissage, par exemple au revers d'une trappe, et donner les renseignements suivants : nature du carburant (par exemple « CHG » pour l'hydrogène gazeux), PSN, PMR et date de retrait du service des réservoirs.

5.2.1.1.3 L'embout de remplissage doit être monté sur le véhicule de façon à assurer un verrouillage par enclenchement de la buse de ravitaillement. L'embout doit être protégé contre toute manipulation non autorisée et toute entrée de poussières ou d'eau (par exemple en l'installant dans un compartiment verrouillable). La vérification se fait par contrôle visuel.

5.2.1.1.4 L'embout de remplissage ne doit pas être monté sur des éléments destinés à absorber l'énergie extérieure d'un choc (par exemple les pare-chocs), ni dans l'habitacle ou le coffre à bagages ou tout autre endroit où la ventilation est insuffisante et où l'hydrogène gazeux pourrait s'accumuler. La vérification se fait par contrôle visuel.

- 5.2.1.2 Protection du système basse pression contre les surpressions (voir la procédure d'essai au paragraphe 6.1.6)
- La partie du système située en aval d'un détendeur (partie basse pression) doit être protégée contre toute surpression due à une défaillance éventuelle de ce dernier. La pression de déclenchement du dispositif de protection contre les surpressions doit être inférieure ou égale à la pression de service maximale admissible de la partie concernée du système.
- 5.2.1.3 Systèmes d'évacuation de l'hydrogène
- 5.2.1.3.1 Dispositifs de décompression (voir la procédure d'essai au paragraphe 6.1.6)
- a) L'orifice de sortie de la ligne de mise à l'air libre des dispositifs de décompression thermocommandés du système de stockage d'hydrogène comprimé doit être protégé pour éviter que du sable ou de l'eau n'y pénètre ;
 - b) Le flux d'hydrogène gazeux libéré par le ou les TPRD du système de stockage d'hydrogène comprimé doit être dirigé de manière à ne pas pouvoir se rabattre vers :
 - i) Des espaces fermés ou semi-fermés ;
 - ii) Un passage de roue ;
 - iii) Des réservoirs d'hydrogène gazeux ;
 - iv) Le SRSEE du véhicule.
- 5.2.1.3.2 Système d'échappement du véhicule (voir la procédure d'essai au paragraphe 6.1.4)
- Au point d'évacuation des gaz :
- a) La concentration moyenne en hydrogène doit être inférieure ou égale à 4,0 % en volume (moyenne mobile sur 3 s) en fonctionnement normal, y compris les phases de démarrage et d'arrêt du moteur ;
 - b) La concentration instantanée en hydrogène (pics) doit être inférieure ou égale à 8,0 % (voir la procédure d'essai au paragraphe 6.1.4).
- 5.2.1.4 Protection contre le risque d'incendie en cas de défaillance unique
- 5.2.1.4.1 En cas de rejet ou de fuite/perméation d'hydrogène gazeux depuis le système d'alimentation en carburant du véhicule, l'hydrogène ne doit pas être libéré directement dans l'habitacle ou le compartiment à bagages, ni dans aucun espace fermé ou semi-fermé à l'intérieur du véhicule contenant une source d'inflammation non protégée.
- 5.2.1.4.2 Aucune défaillance unique en aval de la vanne d'arrêt principale de l'hydrogène ne doit entraîner la présence d'hydrogène à quelque concentration dans l'air dans l'habitacle, conformément à la procédure d'essai du paragraphe 6.1.3.2.
- 5.2.1.4.3 Si, pendant le fonctionnement, la concentration d'hydrogène dépasse 3,0 % en volume dans l'air des espaces fermés ou semi-fermés du véhicule en raison d'une défaillance unique, une alarme doit se déclencher (voir par. 5.2.1.6). Si la concentration dépasse 4,0 %, la vanne d'arrêt principale doit se fermer pour isoler le système de stockage (voir la procédure d'essai au paragraphe 6.1.3).
- 5.2.1.5 Fuite du système d'alimentation en carburant
- Les tuyauteries d'alimentation en hydrogène situées en aval de la vanne d'arrêt principale ne doivent pas présenter de fuite. Les essais de vérification doivent être effectués à la pression de service nominale (voir la procédure d'essai au paragraphe 6.1.5).

- 5.2.1.6 Système d'alarme visuelle
- Le conducteur doit être averti par un voyant d'alarme visuelle (symbole ou texte) répondant aux conditions suivantes :
- a) Il doit être visible par le conducteur assis en position de conduite et ceinture de sécurité attachée ;
 - b) Il doit s'allumer en jaune en cas de dysfonctionnement du système de détection (par exemple, déconnexion de circuit, court-circuit, défaillance du capteur) et en rouge si les conditions énoncées au paragraphe 5.2.1.4.3 sont remplies ;
 - c) Lorsqu'il est allumé, il doit être visible par le conducteur aussi bien de jour que de nuit ;
 - d) Il doit rester allumé lorsque la concentration d'hydrogène est supérieure à 3,0 % ou lorsque le système de détection présente un dysfonctionnement et que le contact est mis ou que le système de propulsion est activé.
- 5.2.2 Intégrité du système d'alimentation en carburant après un choc
- Les Parties contractantes peuvent continuer à effectuer les essais de choc prévus par leurs réglementations nationales (essais de choc avant, de choc latéral, de choc arrière et essai de retournement) et doivent respecter les valeurs limites énoncées aux paragraphes 5.2.2.1 à 5.2.2.3.
- 5.2.2.1 Débit de fuite admissible après un choc
- Le débit volumique moyen de la fuite d'hydrogène gazeux calculé sur l'intervalle de temps Δt défini conformément au paragraphe 6.1.1.1 ou 6.1.1.2 doit être inférieur ou égal à 118 NI/min.
- 5.2.2.2 Limite de concentration dans les espaces clos après un choc
- En cas de fuite, la concentration en hydrogène dans l'air de l'habitacle et du compartiment à bagages doit être inférieure ou égale à 4,0 % en volume (voir les procédures d'essai au paragraphe 6.1.2). Cette prescription est satisfaite s'il est établi que la vanne d'arrêt du système de stockage s'est fermée dans 5 s suivant le choc et que le système de stockage ne présente pas de fuite.
- 5.2.2.3 Déplacement du réservoir
- Le ou les réservoirs doivent rester fixés au véhicule au moins par un point.

6. Conditions et procédures d'essai

- 6.1 Essais de conformité : intégrité du système d'alimentation en carburant
- 6.1.1 Essai d'étanchéité du système de stockage d'hydrogène comprimé après choc
- Les essais de choc réalisés pour mesurer les fuites d'hydrogène après un choc sont ceux déjà mis en œuvre par les Parties contractantes dans leurs juridictions.
- Avant de subir l'essai de choc, le système de stockage d'hydrogène comprimé est équipé d'instruments de mesure de la pression et de la température, sauf si le véhicule est déjà équipé d'instruments offrant la précision requise.
- Si nécessaire, le système de stockage est ensuite purgé conformément aux instructions du fabricant afin de débarrasser le réservoir de ses impuretés avant de remplir le système avec de l'hydrogène ou de l'hélium comprimé. La pression dans le système de stockage variant en fonction de la température, c'est également le cas de la pression de remplissage cible. La pression cible est déterminée au moyen de l'équation suivante ;

$$P_{\text{target}} = \text{PSN} \times (273 + T_0)/288$$

où PSN est la pression de service nominale (MPa), T_0 , la température ambiante à laquelle le système de stockage est censé se stabiliser et P_{target} , la pression de remplissage cible, c'est-à-dire la pression après stabilisation de la température.

Le réservoir est rempli au minimum à 95 % de la pression de remplissage cible ; on le laisse ensuite se stabiliser avant de procéder à l'essai de choc.

La vanne d'arrêt principale et les autres vannes d'arrêt de l'hydrogène, situées dans la partie aval du circuit d'hydrogène, sont, dans les conditions normales de conduite, maintenues ouvertes immédiatement avant le choc.

6.1.1.1 Essai d'étanchéité après choc sur un système de stockage d'hydrogène comprimé rempli d'hydrogène comprimé

La pression P_0 (MPa) et la température T_0 (°C) de l'hydrogène sont mesurées immédiatement avant le choc puis après un intervalle de temps Δt (min). Le début de l'intervalle Δt correspond au moment où le véhicule s'immobilise après le choc, sa durée est d'au moins 60 min. On peut le prolonger, si nécessaire, pour améliorer la précision des mesures dans le cas d'un système de stockage de grand volume fonctionnant à une pression pouvant atteindre 70 MPa. Dans ce cas, Δt peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$\Delta t = V_{\text{CHSS}} \times \text{PSN}/1000 \times ((-0,027 \times \text{PSN} + 4) \times R_s - 0,21) - 1,7 \times R_s$$

où $R_s = P_s/\text{PSN}$, P_s est la plage de pression du capteur de pression (MPa), PSN, la pression de service nominale (MPa), V_{CHSS} , le volume du système de stockage d'hydrogène comprimé (l), et Δt , l'intervalle de temps (min). Si la valeur de Δt calculée est inférieure à 60 min, Δt est fixé à 60 min.

La masse initiale d'hydrogène dans le système de stockage peut être calculée comme suit :

$$P_o' = P_o \times 288/(273 + T_0)$$

$$\rho_o' = -0,0027 \times (P_o')^2 + 0,75 \times P_o' + 1,07$$

$$M_o = \rho_o' \times V_{\text{CHSS}}$$

De même, la masse finale d'hydrogène M_f dans le système de stockage d'hydrogène comprimé à la fin de l'intervalle de temps Δt peut être calculée comme suit :

$$P_f' = P_f \times 288/(273 + T_f)$$

$$\rho_f' = -0,0027 \times (P_f')^2 + 0,75 \times P_f' + 1,07$$

$$M_f = \rho_f' \times V_{\text{CHSS}}$$

où P_f est la pression finale mesurée (MPa) à la fin de l'intervalle de temps et T_f , la température finale mesurée (°C).

Le débit moyen d'hydrogène pendant l'intervalle de temps (qui doit être inférieur au débit indiqué au paragraphe 5.2.2.1) se calcule donc comme suit :

$$V_{\text{H}_2} = (M_f - M_o)/\Delta t \times 22,41/2,016 \times (P_{\text{target}}/P_o)$$

où V_{H_2} est le débit volumique moyen (NI/min) pendant l'intervalle de temps et où le terme P_{target}/P_o rend compte de l'écart entre la pression initiale mesurée P_o et la pression de remplissage cible P_{target} .

6.1.1.2 Essai d'étanchéité après choc sur un système de stockage d'hydrogène comprimé rempli d'hélium comprimé

La pression P_0 (MPa) et la température T_0 (°C) de l'hélium sont mesurées immédiatement avant le choc puis après un intervalle de temps prédéterminé Δt (min). Le début de l'intervalle Δt correspond au moment où le véhicule s'immobilise après le choc, sa durée est d'au moins 60 min.

On peut le prolonger, si nécessaire, pour améliorer la précision des mesures dans le cas d'un système de stockage de grand volume fonctionnant à une pression pouvant atteindre 70 MPa. Dans ce cas, Δt peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$\Delta t = V_{\text{CHSS}} \times \text{PSN}/1000 \times ((-0,028 \times \text{PSN} + 5,5) \times R_s - 0,3) - 2,6 \times R_s$$

où $R_s = P_s/\text{PSN}$, P_s est la plage de pression du capteur de pression (MPa), PSN, la pression de service nominale (MPa), V_{CHSS} , le volume du système de stockage d'hydrogène comprimé (l), et Δt , l'intervalle de temps (min). Si la valeur de Δt calculée est inférieure à 60 min, Δt est fixé à 60 min.

La masse initiale d'hélium dans le système de stockage est calculée comme suit :

$$P_o' = P_o \times 288/(273 + T_o)$$

$$\rho_o' = -0,0043 \times (P_o')^2 + 1,53 \times P_o' + 1,49$$

$$M_o = \rho_o' \times V_{\text{CHSS}}$$

La masse finale d'hélium dans le système de stockage d'hydrogène comprimé à la fin de l'intervalle de temps Δt est calculée comme suit :

$$P_f' = P_f \times 288/(273 + T_f)$$

$$\rho_f' = -0,0043 \times (P_f')^2 + 1,53 \times P_f' + 1,49$$

$$M_f = \rho_f' \times V_{\text{CHSS}}$$

où P_f est la pression finale mesurée (MPa) à la fin de l'intervalle de temps et T_f , la température finale mesurée (°C).

Le débit moyen d'hélium pendant l'intervalle de temps se calcule donc comme suit :

$$V_{\text{He}} = (M_f - M_o)/\Delta t \times 22,41/4,003 \times (P_{\text{target}}/P_o)$$

où V_{He} est le débit volumique moyen (NI/min) pendant l'intervalle de temps et où le terme P_{target}/P_o rend compte de l'écart entre la pression initiale mesurée P_o et la pression de remplissage cible P_{target} .

Le débit volumique moyen d'hélium est converti en débit volumique moyen d'hydrogène à l'aide de la formule suivante :

$$V_{\text{H}_2} = V_{\text{He}}/0,75$$

où V_{H_2} est le débit volumique moyen d'hydrogène (qui doit être inférieur au débit indiqué au paragraphe 5.2.2.1).

6.1.2 Essai de mesure des concentrations de gaz dans les espaces fermés après choc

Les concentrations d'hydrogène (ou d'hélium) sont enregistrées au cours de l'essai de choc destiné à étudier les fuites éventuelles (voir la procédure d'essai au paragraphe 6.1.1).

On utilise des capteurs permettant de mesurer soit l'augmentation de la concentration d'hydrogène ou d'hélium, soit la baisse correspondante de la concentration en oxygène (résultant du déplacement d'air induit par les fuites d'hydrogène ou d'hélium).

Les capteurs doivent être étalonnés à partir de références reconnues afin de pouvoir mesurer avec une précision de $\pm 5\%$ les valeurs cibles de concentration volumique dans l'air, à savoir 4,0 % pour l'hydrogène et 3,0 % pour l'hélium ; la limite supérieure de la plage de mesure à pleine échelle doit être supérieure à ces valeurs d'au moins 25 %. Leur temps de réponse à 90 % à une variation de la concentration correspondant à la pleine échelle doit être inférieur à 10 s.

Avant l'essai de choc, les capteurs sont placés dans l'habitacle et le compartiment à bagages du véhicule comme suit :

- a) À 250 mm au maximum du garnissage de pavillon au-dessus du siège conducteur ou à proximité du point haut de la partie centrale de l'habitacle ;
- b) À 250 mm au maximum du plancher en avant du siège arrière (ou le plus en arrière) dans l'habitacle ;
- c) À 100 mm au maximum du point haut du compartiment à bagages situé dans une partie du véhicule qui n'est pas directement affectée par l'essai de choc.

Les capteurs sont solidement fixés à la structure du véhicule ou aux sièges et protégés des projections de débris et d'objets et des gaz libérés par les coussins de sécurité gonflables. Les données mesurées après le choc sont enregistrées par des instruments placés dans le véhicule ou à distance.

L'essai de choc peut se dérouler soit à l'extérieur, en un lieu protégé du vent et du soleil, ou à l'intérieur, dans un espace suffisamment grand ou ventilé, afin que la concentration en hydrogène reste inférieure à 10 % des valeurs cibles dans l'habitacle et le compartiment à bagages.

Dans un espace fermé, les mesures commencent dès que le véhicule s'est immobilisé. Les données relevées par les capteurs sont collectées à des intervalles de temps inférieurs ou égaux à 5 s pendant 60 min. On peut calculer la moyenne mobile des mesures sur des intervalles de temps inférieurs ou égaux à 5 s pour lisser les données et filtrer les données aberrantes.

Les valeurs filtrées fournies par les capteurs doivent être inférieures aux valeurs cibles de concentration, à savoir 4,0 % pour l'hydrogène et 3,0 % pour l'hélium à tout instant durant la période de 60 min suivant le choc.

6.1.3 Essai de conformité : cas d'une défaillance unique

La procédure d'essai présentée au paragraphe 6.1.3.2 doit être exécutée afin de vérifier la conformité aux prescriptions du paragraphe 5.2.1.4.2.

L'une quelconque des procédures d'essai présentées aux paragraphes 6.1.3.1 et 6.1.3.2 doit être exécutée afin de vérifier la conformité aux prescriptions du paragraphe 5.2.1.4.3 :

6.1.3.1 Procédure d'essai pour un véhicule équipé de détecteurs d'hydrogène

6.1.3.1.1 Conditions d'essai

6.1.3.1.1.1 Véhicule d'essai. On démarre le système de propulsion du véhicule d'essai, on le porte à sa température normale de fonctionnement et on le laisse tourner au ralenti pendant toute la durée de l'essai. S'il ne s'agit pas d'un véhicule à pile à combustible, il convient de le préchauffer et de le laisser fonctionner au ralenti. Si le véhicule d'essai est doté d'un système d'arrêt automatique du ralenti, des mesures doivent être prises pour empêcher l'arrêt du moteur.

6.1.3.1.1.2 Gaz d'essai. Le gaz d'essai est un mélange d'air et d'hydrogène. La concentration d'hydrogène dans l'air est $> 3,0\%$ pour la vérification du bon fonctionnement de l'alarme, et $> 4,0\%$ pour la vérification du bon fonctionnement de la vanne d'arrêt. Les concentrations appropriées sont choisies sur la base des recommandations du fabricant (ou des caractéristiques du détecteur).

Note : Les restrictions ou interdictions concernant le stockage de prémélanges gazeux dont la concentration d'hydrogène dans l'air est supérieure à 2 % dans des bouteilles de gaz comprimé peuvent varier selon les juridictions dont dépendent les laboratoires d'essai. Une autre solution consiste à produire sur place (dans la zone d'essai) des mélanges gazeux dont la concentration d'hydrogène dans l'air peut atteindre 4 % à l'aide d'une station de mélange qui

injecte la quantité requise d'hydrogène dans un flux d'air. Le mélange air-hydrogène peut ensuite être acheminé vers le point de libération situé à l'intérieur du véhicule au moyen d'un tuyau flexible.

6.1.3.1.2 Méthode d'essai

6.1.3.1.2.1 Préparation de l'essai. L'essai doit être réalisé à l'abri du vent.

- a) Le tuyau d'alimentation en gaz d'essai est fixé sur le détecteur d'hydrogène ;
- b) Le détecteur est recouvert d'un capot afin de retenir le gaz.

6.1.3.1.2.2 Exécution de l'essai

- a) Du gaz d'essai est envoyé vers le détecteur de fuites d'hydrogène ;
- b) Le déclenchement du système d'alarme dans les 10 s qui suivent permet de valider le bon fonctionnement de celui-ci ;
- c) La fermeture de la vanne d'arrêt principale dans les 10 s qui suivent permet de valider le bon fonctionnement de celle-ci. La surveillance de l'alimentation électrique de la vanne d'arrêt principale ou le bruit émis par la fermeture de celle-ci permettent de confirmer qu'elle fonctionne correctement.

6.1.3.2 Procédure d'essai pour la vérification de l'intégrité des espaces fermés et des systèmes de détection

6.1.3.2.1 Préparation

6.1.3.2.1.1 L'essai doit être réalisé à l'abri du vent.

6.1.3.2.1.2 Une attention particulière doit être portée à l'environnement d'essai. En effet, durant l'essai, des mélanges inflammables d'hydrogène et d'air peuvent se former.

6.1.3.2.1.3 Avant de procéder à l'essai, on prépare le véhicule de façon à pouvoir simuler à distance des fuites du système de stockage d'hydrogène. Les fuites d'hydrogène peuvent être simulées à l'aide d'un système d'alimentation externe sans que les tuyauteries de carburant du véhicule d'essai soient modifiées. Le nombre et l'emplacement des points de rejet en aval de la vanne d'arrêt principale ainsi que les débits de fuite correspondants sont définis par le constructeur du véhicule sur la base des scénarios de fuite les plus défavorables dans le cas d'une défaillance unique. Au minimum, le débit cumulé de toutes les fuites commandées à distance doit être suffisant pour déclencher l'alarme et la fermeture de la vanne d'arrêt.

6.1.3.2.1.4 Un détecteur d'hydrogène est installé dans la partie de l'habitacle dans laquelle l'hydrogène risque le plus de s'accumuler (par exemple à proximité du garnissage de pavillon) afin de vérifier la conformité aux prescriptions du paragraphe 5.2.1.4.2 ; des détecteurs d'hydrogène sont installés dans les volumes fermés ou semi-fermés du véhicule dans lesquels l'hydrogène peut s'accumuler lors des simulations de fuite afin de vérifier la conformité aux prescriptions du paragraphe 5.2.1.4.3 (voir le paragraphe 6.1.3.2.1.3).

6.1.3.2.2 Procédure

6.1.3.2.2.1 Les portières, fenêtres et autres ouvertures du véhicule doivent être fermées.

6.1.3.2.2.2 On démarre le système de propulsion, on le porte à sa température normale de fonctionnement et on le laisse tourner au ralenti pendant toute la durée de l'essai.

6.1.3.2.2.3 On simule une fuite au moyen de la commande à distance.

- 6.1.3.2.2.4 On mesure la concentration d'hydrogène en continu jusqu'à ce qu'elle n'augmente plus pendant 3 min. Afin de vérifier la conformité aux prescriptions du paragraphe 5.2.1.4.3, on augmente ensuite le débit de fuite jusqu'à ce que la vanne d'arrêt principale se ferme et que le signal d'alarme se déclenche. La surveillance de l'alimentation électrique de la vanne d'arrêt principale ou le bruit émis par la fermeture de celle-ci permettent de confirmer qu'elle fonctionne correctement.
- 6.1.3.2.2.5 Les prescriptions du paragraphe 5.2.1.4.2 sont respectées si la concentration d'hydrogène dans l'habitacle ne dépasse pas 1,0 % pendant l'essai. Les prescriptions du paragraphe 5.2.1.4.3 sont respectées si le signal d'alarme et la fermeture de vanne se déclenchent aux concentrations spécifiées au paragraphe 5.2.1.4.3 (ou à des concentrations inférieures) ; dans le cas contraire, le système ne satisfait pas aux critères de l'essai et n'est pas qualifié pour être mis en service sur le véhicule.
- 6.1.4 Essai de conformité du système d'échappement du véhicule
- 6.1.4.1 On préchauffe le système moteur du véhicule d'essai (pile à combustible ou moteur) jusqu'à sa température normale de fonctionnement.
- 6.1.4.2 Avant utilisation, on porte l'appareil de mesure à sa température normale de fonctionnement.
- 6.1.4.3 On place la sonde de l'appareil de mesure sur l'axe longitudinal du flux de gaz d'échappement, à 100 mm au maximum du point de rejet dans l'atmosphère.
- 6.1.4.4 On mesure en continu la concentration d'hydrogène dans les gaz d'échappement au cours des étapes suivantes :
- a) Mise à l'arrêt du système moteur ;
 - b) À la fin de la procédure d'arrêt, redémarrage immédiat du système moteur ;
 - c) À la fin de la procédure de démarrage telle que définie par le constructeur, mise à l'arrêt du système moteur et poursuite des mesures jusqu'à la fin de la procédure d'arrêt.
- 6.1.4.5 L'appareil de mesure doit :
- a) Avoir un temps de réponse ($t_0 - t_{90}$) inférieur à 2 s, t_0 étant l'instant où la concentration d'hydrogène commence à changer et t_{90} celui où l'on atteint 90 % de la valeur finale ;
 - b) Avoir un temps de résolution inférieur à 300 ms (fréquence d'échantillonnage > 3,33 Hz).
- 6.1.5 Essai de conformité de la tuyauterie d'alimentation en carburant
- 6.1.5.1 On fait chauffer le système moteur du véhicule d'essai (pile à combustible ou moteur) jusqu'à sa température normale de fonctionnement, la tuyauterie d'alimentation en carburant étant sous pression.
- 6.1.5.2 On recherche les fuites d'hydrogène sur les parties accessibles de la tuyauterie d'alimentation en carburant, entre la partie haute pression et la pile à combustible (ou le moteur), à l'aide d'un détecteur de gaz ou d'un liquide de détection des fuites tel qu'une solution savonneuse.
- 6.1.5.3 La recherche doit s'effectuer essentiellement au niveau des joints.
- 6.1.5.4 Si on utilise un détecteur de gaz, celui-ci doit être placé aussi près que possible de la tuyauterie et activé pendant au moins 10 s en chaque point.
- 6.1.5.5 Si on utilise un liquide de détection des fuites, l'observation doit être effectuée immédiatement après l'application du liquide. En outre, il convient de procéder à des contrôles visuels quelques minutes après l'application pour détecter d'éventuelles bulles causées par des microfuites.

- 6.1.6 Vérification de l'installation
- Il convient de vérifier la conformité du système par inspection visuelle.
- 6.2 Procédures d'essai pour un système de stockage d'hydrogène comprimé
- 6.2.1 Les procédures d'essai de conformité des systèmes de stockage d'hydrogène comprimé sont organisées comme suit :
- Paragraphes 6.2.2 et 6.2.3 : Procédures d'essai de vérification des caractéristiques de référence (voir le paragraphe 5.1.1) et procédures d'essai de vérification de la durabilité (voir le paragraphe 5.1.2) ;
- Paragraphe 6.2.4 : Procédures d'essai de vérification des caractéristiques attendues en utilisation sur route (voir le paragraphe 5.1.3) ;
- Paragraphe 6.2.5 : Procédures d'essai de vérification du comportement au feu (voir le paragraphe 5.1.4) ;
- Paragraphe 6.2.6 : Procédures d'essai de vérification de la durabilité des dispositifs de fermeture primaire (voir le paragraphe 5.1.5).
- Sauf indication contraire, tous les essais sont menés à une température ambiante de 20 ± 15 °C.
- Sauf indication contraire, la fréquence d'échantillonnage des données pour les essais de cycles de pression est d'au moins 1 Hz.
- Sauf indication contraire, le fabricant peut recommander des limites de tolérance des paramètres d'essai qui ne sont pas définies de manière stricte. Les tolérances figurant au tableau 10 de la section O sont données à titre indicatif.
- 6.2.2 Procédures d'essai de vérification des caractéristiques de référence
- 6.2.2.1 Essai de résistance à l'éclatement (essai hydraulique)
- L'essai de résistance à l'éclatement doit être effectué à température ambiante, à l'aide d'un fluide hydraulique. La vitesse de montée en pression doit être $\leq 1,4$ MPa/s pour les pressions supérieures à 150 % de la pression de service nominale. Si elle dépasse 0,35 MPa/s aux pressions supérieures à 150 % de la PSN, il faut que le réservoir soit placé en série entre la source de pression et le dispositif de mesure de celle-ci, ou que la durée pendant laquelle la pression est supérieure à la pression d'éclatement visée soit supérieure à 5 s. La pression d'éclatement du réservoir doit être consignée.
- 6.2.2.2 Essai de cycles de pression à température ambiante (essai hydraulique)
- Cet essai doit être conduit conformément à la procédure ci-après et aux paramètres d'essai indiqués au tableau 3 :
- a) On remplit le spécimen d'essai de fluide hydraulique ;
 - b) Au début de l'essai, on stabilise le spécimen d'essai et le fluide à la température indiquée au tableau 3. Le milieu ambiant, le fluide hydraulique et la surface du spécimen d'essai doivent être maintenus à la température indiquée du début à la fin des cycles de pression. La température du spécimen d'essai peut toutefois s'écarter de la température ambiante durant les cycles de pression ;
 - c) On soumet le spécimen d'essai à des cycles de pression entre 2 ± 1 MPa et la pression cible indiquée au tableau 3 ;
 - d) La température du fluide hydraulique entrant dans le réservoir est maintenue à la valeur spécifiée et mesurée le plus près possible de l'orifice d'entrée du réservoir.

Note : Le fabricant du réservoir peut définir un profil de cycle de pression adéquat afin d'éviter une défaillance prématurée du réservoir due à des conditions d'essai en dehors des limites de conception.

Tableau 3
Cycles de pression et conditions d'essai

<i>Objet</i>	<i>Nombre de cycles</i>	<i>Pression cible</i>	<i>Température</i>	<i>Vitesse</i>
Résistance aux cycles de pression (par. 5.1.1.2)	22 000 cycles ou jusqu'à l'apparition d'une fuite	≥ 125 % de la PSN	Milieu ambiant 20 ± 15 °C Fluide hydraulique 20 ± 15 °C	≤ 10 cycles par minute

6.2.3 Procédures d'essai de vérification de la durabilité des caractéristiques (voir le paragraphe 5.1.2)

6.2.3.1 Essai de pression d'épreuve

Le réservoir muni de ses éventuels accessoires est mis sous pression graduellement, avec un fluide hydraulique ou du gaz, jusqu'à ce que la pression cible soit atteinte. Cette pression est alors maintenue pendant la durée spécifiée au tableau 4.

Tableau 4
Pression cible et durée de maintien de la pression d'épreuve

<i>Objet</i>	<i>Pression cible</i>	<i>Durée de maintien</i>
Essai de pression d'épreuve (réservoir neuf) (par. 5.1.2.1 et 5.1.3.1)	≥ 150 % de la PSN	≥ 30 s
Essai de pression d'épreuve en fin de vie (par. 5.1.2.7 et 5.1.3.4)	≥ 180 % de la PSN	≥ 4 min

6.2.3.2 Essai de chute (choc) (sans mise sous pression)

Le réservoir muni de ses éventuels accessoires est soumis à l'essai de chute sans pression interne et sans vannes. La surface sur laquelle tombe le spécimen d'essai doit être une dalle en béton horizontale et lisse ou une surface de dureté équivalente. Aucune mesure ne doit être prise pour empêcher le spécimen d'essai de rebondir ou de se renverser au cours d'un essai de chute ; par contre, il convient de l'empêcher de se renverser pendant l'essai de chute verticale.

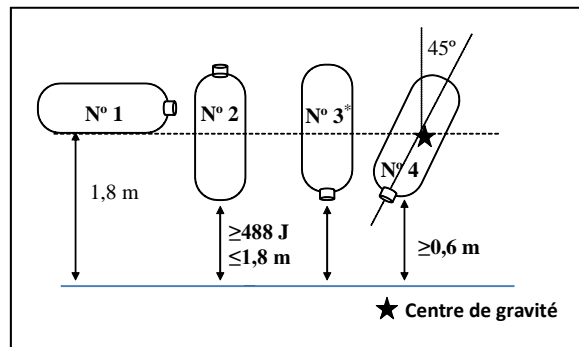
On laisse tomber le spécimen d'essai selon l'une quelconque des quatre orientations suivantes :

- a) Chute à l'horizontale, le fond du réservoir se trouvant à 1,8 m au-dessus du sol. Dans le cas d'un réservoir non axisymétrique, la plus grande surface projetée du réservoir doit être horizontale et placée côté sol, l'axe passant par l'interface de la vanne d'arrêt et le centre de gravité du réservoir étant dans la mesure du possible horizontal ;
- b) Chute à la verticale, l'embase de fixation de la vanne d'arrêt étant le point haut, la hauteur de chute correspondant à une énergie potentielle de 488 J. L'extrémité inférieure du réservoir (point bas) ne doit en aucun cas se trouver à moins de 0,1 m ou plus de 1,8 m au-dessus du sol. Dans le cas d'un réservoir non axisymétrique, l'axe passant par l'interface de la vanne d'arrêt et le centre de gravité du réservoir doit être vertical ;

- c) Chute à la verticale, l'embase de fixation de la vanne d'arrêt étant le point bas, la hauteur de chute correspondant à une énergie potentielle de 488 J. L'extrémité inférieure du réservoir (point bas) ne doit en aucun cas se trouver à moins de 0,1 m ou plus de 1,8 m au-dessus du sol. Dans le cas d'un réservoir symétrique (c'est-à-dire avec deux extrémités identiques), il n'est pas nécessaire de procéder à cet essai. Dans le cas d'un réservoir non axisymétrique, l'axe passant par l'interface de la vanne d'arrêt et le centre de gravité du réservoir doit être vertical ;
- d) Chute selon un angle de 45° par rapport à la verticale, l'embase de fixation de la vanne d'arrêt étant le point bas, le centre de gravité du réservoir étant situé à 1,8 m au-dessus du sol et l'extrémité inférieure (point bas) du réservoir au minimum à 0,6 m du sol. Si cette dernière condition n'est pas satisfaite, il convient de modifier l'angle de chute en conséquence tout en respectant le critère concernant la hauteur du centre de gravité. Dans le cas d'un réservoir non axisymétrique, l'axe passant par l'embase de fixation de la vanne d'arrêt et le centre de gravité du réservoir doit former un angle de 45° par rapport à la verticale et l'embase de la vanne d'arrêt doit être le point bas.

Les quatre orientations de chute sont illustrées ci-après.

Figure 3
Orientations de chute



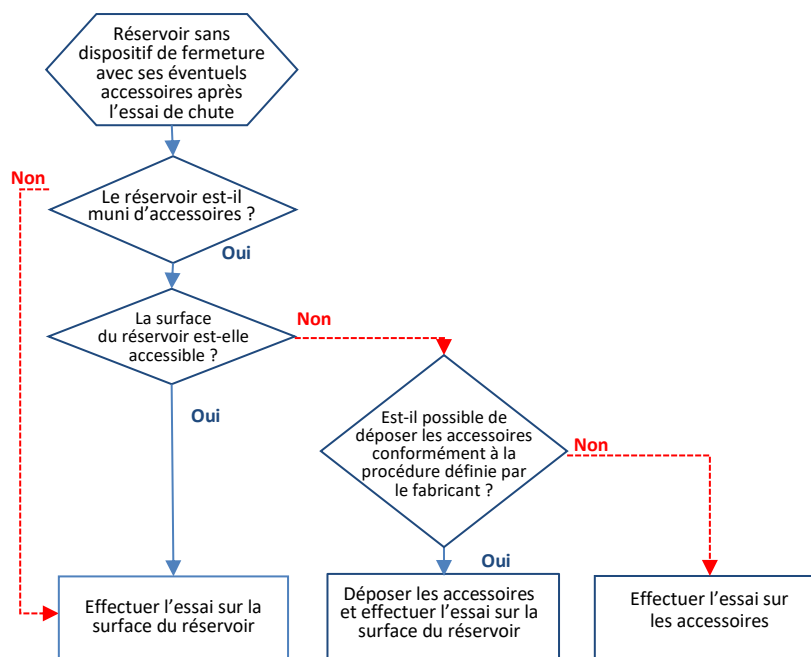
6.2.3.3 Essai de détérioration de la surface (sans mise sous pression)

Les essais de détérioration de surface et d'exposition aux agents chimiques (par. 6.2.3.4) doivent être effectués sur la surface de la chambre du réservoir soumise à la pression si elle est accessible, que le réservoir soit ou non muni d'accessoires.

S'il est possible de démonter les accessoires conformément à la procédure définie par le fabricant, ceux-ci doivent être déposés. On procède ensuite aux essais sur la surface de la chambre du réservoir soumise à la pression.

Dans le cas contraire, les essais doivent être effectués sur la surface des accessoires, comme illustré à la figure 4.

Figure 4
Diagramme de décision : essai de détérioration de surface



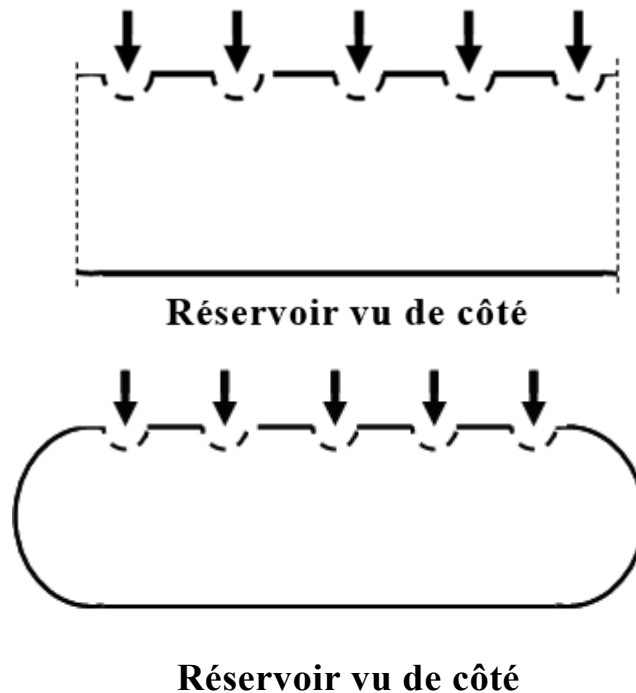
Cet essai se déroule comme suit :

- a) Entaillage de la surface : Une entaille d'au moins 0,75 mm de profondeur et 200 mm de long est pratiquée à la scie sur la surface définie ci-avant.

Si le réservoir est destiné à être monté sur le véhicule par compression de sa surface composite, on fait une seconde entaille d'au moins 1,25 mm de profondeur et 25 mm de long à l'extrémité du réservoir située du côté opposé à la première entaille ;

- b) Choc au pendule : La surface du spécimen d'essai située du côté opposé à la surface définie ci-avant, ou la surface d'une autre chambre du réservoir si celui-ci comporte plusieurs chambres raccordées en permanence, doit être divisée en cinq zones distinctes (qui ne se chevauchent pas) d'un diamètre de 100 mm chacune (voir la figure 5). Immédiatement après un préconditionnement d'une durée minimale de 12 h à une température ≤ -40 °C dans une enceinte à atmosphère contrôlée, on percute le centre de chaque zone au moyen d'un pendule pyramidal (faces triangulaires équilatérales et base carrée), le sommet et les arêtes étant arrondis selon un rayon de 3 mm. Le centre de percussion du pendule doit coïncider avec le centre de gravité de la pyramide. L'énergie du pendule à l'instant du choc sur chacune des cinq zones du réservoir doit être ≥ 30 J. Au cours de l'essai, le spécimen d'essai doit être maintenu fermement en place et ne doit pas être sous pression.

Figure 5
Réservoir vu de côté



6.2.3.4 Essai de cycles de pression à température ambiante avec exposition aux agents chimiques

Le réservoir muni de ses éventuels accessoires n'étant pas sous pression, chacune des cinq zones préconditionnées par le choc du pendule (par. 6.2.3.3 b)) est exposée à l'une des cinq solutions ci-après :

- a) Acide sulfurique en solution aqueuse à 19 % en volume (acide de batteries) ;
- b) Hydroxyde de sodium en solution aqueuse à 25 % en poids ;
- c) Méthanol dilué dans de l'essence à 5 % en volume (fluides utilisés dans les stations de ravitaillement) ;
- d) Nitrate d'ammonium en solution aqueuse à 28 % en poids dans l'eau (urée) ;
- e) Méthanol en solution aqueuse à 50 % en volume (liquide lave-glace).

Le spécimen d'essai est orienté avec les zones d'exposition au-dessus. Un tampon de laine de verre d'environ 0,5 mm d'épaisseur et 100 mm de diamètre est posé sur chacune des cinq zones préconditionnées. On verse sur la laine de verre une quantité de solution suffisante pour mouiller le tampon de manière homogène sur toute sa surface et toute son épaisseur pendant toute la durée de l'essai. Une protection en plastique peut être appliquée sur la laine de verre pour éviter l'évaporation.

Le spécimen d'essai est maintenu dans cet état d'exposition durant au moins 48 h, à une pression ≥ 125 % de la PSN (appliquée hydrauliquement) et à température ambiante avant d'être soumis à d'autres essais.

On soumet le spécimen d'essai à des cycles de pression entre 2 ± 1 MPa et les pressions cibles indiquées au tableau 5. Une fois les cycles de pression terminés, on retire les tampons de laine de verre et on rince la surface du réservoir à l'eau.

Tableau 5
Cycles de pression et conditions d'essai – Essai de cycles de pression à température ambiante avec exposition aux agents chimiques

<i>Objet</i>	<i>Nombre de cycles</i>	<i>Pression cible</i>	<i>Température</i>	<i>Vitesse</i>
Essai de cycles de pression à température ambiante avec exposition aux agents chimiques (par. 5.1.2.4)	60 % du nombre de cycles indiqué au paragraphe 5.1.1.2	≥ 125 % de la PSN	Milieu ambiant 20 ± 15 °C	≤ 10 cycles par minute
	les 10 derniers cycles	≥ 150 % de la PSN	Fluide hydraulique 20 ± 15 °C	

6.2.3.5 Essai de pression statique (essai hydraulique)

On remplit le spécimen d'essai de fluide hydraulique et on le soumet à une pression ≥ 125 % de la PSN à une température de 85 °C pendant au moins $1\ 000$ h dans une enceinte à température contrôlée. L'enceinte et la surface du spécimen d'essai sont maintenues à la température spécifiée pendant la durée indiquée.

6.2.3.6 Essai de cycles de pression à des températures extrêmes

Cet essai doit être conduit conformément à la procédure ci-après et aux paramètres d'essai indiqués au tableau 6 :

- a) On remplit le spécimen d'essai de fluide hydraulique avant chaque essai ;
- b) Au début de l'essai, on stabilise le spécimen d'essai et le fluide à la température et à l'humidité relative indiquées au tableau 6. Le milieu ambiant, le fluide hydraulique et la surface du spécimen d'essai doivent être maintenus à la température indiquée du début à la fin des cycles de pression. La température du spécimen d'essai peut toutefois s'écarter de la température ambiante durant les cycles de pression ;
- c) On soumet le spécimen d'essai à des cycles de pression entre 2 ± 1 MPa et les pressions cibles indiquées au tableau 6 ;
- d) La température du fluide hydraulique entrant dans le réservoir est maintenue à la valeur spécifiée et mesurée le plus près possible de l'orifice d'entrée du réservoir.

Note : Il est recommandé de maintenir le réservoir à une pression supérieure à la pression atmosphérique pendant toute la durée de l'essai et d'attendre qu'il soit stabilisé à température ambiante pour le mettre hors pression.

Tableau 6
Cycles de pression et conditions d'essai – Essai de cycles de pression
à des températures extrêmes

Objet	Nombre de cycles	Pression cible	Température	Vitesse
Essai à très basse température	20 % du nombre de cycles indiqué au paragraphe 5.1.1.2	≥ 80 % de la PSN	Milieu ambiant ≤ -40 °C au début de chaque essai	≤ 10 cycles par minute
			Fluide hydraulique et surface du réservoir : ≤ -40 °C du début à la fin des cycles de pression	
Essai à très haute température	20 % du nombre de cycles indiqué au paragraphe 5.1.1.2	≥ 125 % de la PSN	Milieu ambiant ≥ 85 °C et HR ≥ 80 %	≤ 10 cycles par minute
			Fluide hydraulique et surface du réservoir : ≥ 85 °C du début à la fin des cycles de pression	

6.2.4 Procédures d'essai de vérification des caractéristiques attendues en utilisation sur route

La séquence et les paramètres des essais pneumatiques de cycles de pression à températures ambiantes et extrêmes sont indiqués aux tableaux 7a et 7b.

Tableau 7a

Paramètres des essais pneumatiques de cycles de pression à températures ambiantes et extrêmes

Nombre de cycles	Conditions ambiantes	Conditions d'équilibre initial du système de stockage	Température de l'alimentation en carburant	Pression initiale	Pression cible
5	≤ -25 °C	≤ -25 °C	20 ± 5 °C	≤ 2 MPa	Taux de charge ≥ 100 %
5	≤ -25 °C	≤ -25 °C	-33 °C à -40 °C	≤ 2 MPa	Taux de charge ≥ 100 %
15	≤ -25 °C	s/o	-33 °C à -40 °C	≤ 2 MPa	Taux de charge ≥ 100 %
5	≥ 50 °C, HR ≥ 80 %	≥ 50 °C, HR ≥ 80 %	-33 °C à -40 °C	≤ 2 MPa	Taux de charge ≥ 100 %
20	≥ 50 °C, HR ≥ 80 %	s/o	-33 °C à -40 °C	≤ 2 MPa	Taux de charge ≥ 100 %
200	20 °C ± 5 °C	s/o	-33 °C à -40 °C	≤ 2 MPa	Taux de charge ≥ 100 %
1 ^{er} essai de perméation	55 °C à 60 °C	55 °C à 60 °C	s/o	s/o	Taux de charge ≥ 100 %
25	≥ 50 °C, HR ≥ 80 %	s/o	-33 °C à -40 °C	≤ 2 MPa	Taux de charge ≥ 100 %
25	≤ -25 °C	s/o	-33 °C à -40 °C	≤ 2 MPa	Taux de charge ≥ 100 %
200	20 ± 5 °C	s/o	-33 °C à -40 °C	≤ 2 MPa	Taux de charge ≥ 100 %
2 ^e essai de perméation	55 °C à 60 °C	55 °C à 60 °C	s/o	s/o	Taux de charge ≥ 100 %

Tableau 7b

Vitesse de montée en pression du système de stockage d'hydrogène comprimé pour les essais de cycles de pression à températures ambiantes et extrêmes

Volume du système de stockage d'hydrogène comprimé (l)	Vitesse de montée en pression (MPa/min)			
	<i>T</i> ambiante : 50 °C	<i>T</i> ambiante : 20 °C	<i>T</i> ambiante : -25 °C	<i>T</i> ambiante : -25 °C
	$-40\text{ °C} \leq T_{\text{carburant}} \leq -33\text{ °C}$	$-40\text{ °C} \leq T_{\text{carburant}} \leq -33\text{ °C}$	$-40\text{ °C} \leq T_{\text{carburant}} \leq -33\text{ °C}$	$T_{\text{carburant}} = 20\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$
50	7,6	19,9	28,5	13,1
100	7,6	19,9	28,5	7,7
174	7,6	19,9	19,9	5,2
250	7,6	19,9	19,9	4,1
300	7,6	16,5	16,5	3,6
400	7,6	12,4	12,4	2,9
500	7,6	9,9	9,9	2,3
600	7,6	8,3	8,3	2,1
700	7,1	7,1	7,1	1,9
1 000	5,0	5,0	5,0	1,4
1 500	3,3	3,3	3,3	1,0
2 000	2,5	2,5	2,5	0,7
2 500	2,0	2,0	2,0	0,5

6.2.4.1 Essai pneumatique de cycles de pression

- a) Le système de stockage d'hydrogène comprimé est soumis à 500 cycles de pression avec de l'hydrogène gazeux ; ces cycles sont divisés en deux séries de 250 conduits conformément aux paramètres d'essai définis au tableau 7a.

L'environnement d'essai est maintenu à la température et à l'humidité relative prescrites. Lorsque les spécifications de l'essai le prévoient, la température du système de stockage est stabilisée à la température ambiante externe entre les cycles de pression.

Si le système est équipé de dispositifs de régulation qui empêchent la pression de tomber en dessous d'une certaine valeur pendant la durée de service du véhicule, la pression appliquée pendant les cycles ne doit pas descendre en dessous de celle-ci.

La température du carburant doit se trouver dans la plage prescrite dans les 30 secondes qui suivent le début du ravitaillement ;

- b) La vitesse de montée en pression pour un volume donné doit être supérieure ou égale à la vitesse de montée en pression calculée par interpolation linéaire à partir des valeurs du tableau 7b. Toutefois, si la température interne du réservoir dépasse 85 °C, il est possible de réduire la vitesse de montée en pression pour maintenir la température interne au niveau requis ;
- c) Si le véhicule est équipé de dispositifs ou commandes destinés à protéger le système de stockage d'hydrogène comprimé contre les températures internes extrêmes, il est possible d'exécuter l'essai avec ceux-ci (ou avec des instruments ayant une fonction équivalente) ;

- d) La vitesse de vidage doit être supérieure ou égale à la consommation instantanée maximale théorique du véhicule. Sur les 500 cycles de pression, 50 sont effectués avec une vitesse de vidage supérieure ou égale à la vitesse de vidage pendant la maintenance indiquée par le fabricant sur l'étiquette du réservoir ou dans les manuels d'utilisation ou d'entretien ;
- e) Dans le cas d'une fuite localisée, le débit de fuite maximal admissible doit être conforme aux dispositions de l'alinéa b) du paragraphe 6.2.4.3.

6.2.4.2 Essai pneumatique de perméation du gaz

Cet essai est effectué après chacune des deux séries de 250 cycles décrites au tableau 7a du paragraphe 6.2.4.

Le système de stockage est rempli entièrement avec de l'hydrogène gazeux à un taux de charge $\geq 100\%$; on le laisse ensuite se stabiliser pendant au moins 12 h à une température comprise entre 55 °C et 60 °C dans une enceinte hermétique avant de procéder à l'essai. L'essai se poursuit jusqu'à ce que la vitesse de perméation se stabilise (l'écart entre trois mesures consécutives effectuées à 12 h d'intervalle doit être inférieur ou égal à 10 %) ou pendant 500 h, selon l'événement qui survient en premier.

6.2.4.3 Essai de fuite localisée (essai pneumatique)

La recherche de fuite localisée peut se faire au moyen d'un essai de bulles selon la procédure suivante :

- a) L'orifice de sortie de la vanne d'arrêt ainsi que les autres raccords internes au système de stockage d'hydrogène doivent être obturés (l'essai portant sur la recherche de fuite externe).

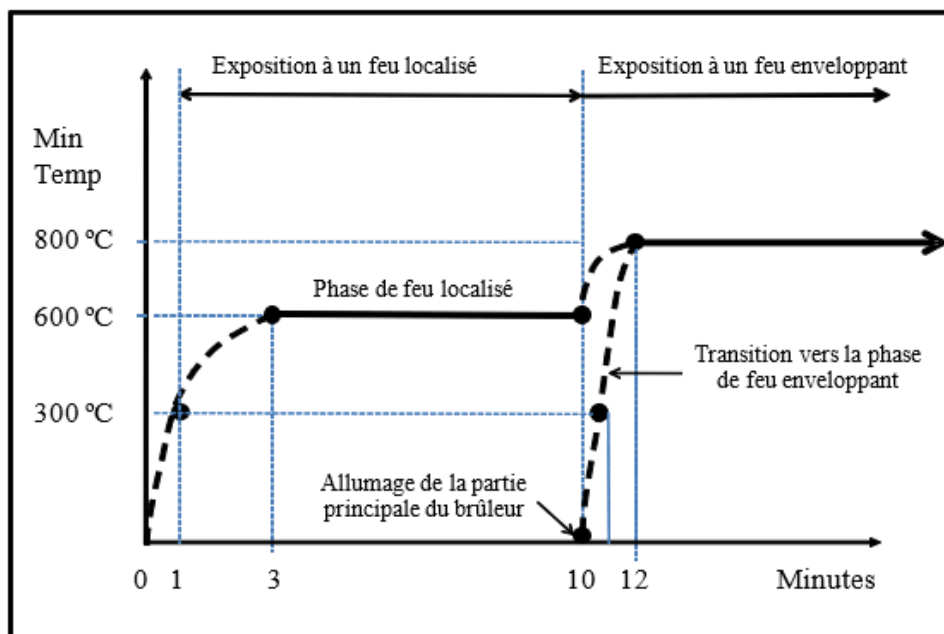
Au choix du fabricant ou du laboratoire d'essai, la recherche de fuite peut être effectuée en immergeant le spécimen d'essai dans le fluide d'essai ou en appliquant le fluide d'essai sur le spécimen placé à l'air libre. La taille des bulles produites par la fuite peut être très variable selon les conditions. Le débit de fuite est déterminé à partir de la taille et de la vitesse de formation des bulles.

- b) Le débit de fuite maximal admissible, qui est de 0,005 mg/s (3,6 Nml/min), correspond à la formation d'environ 2 030 bulles de 1,5 mm de diamètre (taille typique) par minute. Même avec des bulles beaucoup plus grandes, la fuite doit être aisément détectable. Pour un diamètre de 6 mm, c'est-à-dire particulièrement grand, on observerait la formation d'environ 32 bulles par minute.

6.2.5 Procédures d'essai de feu localisé/enveloppant en deux phases (par. 5.1.4)

L'essai se déroule en deux temps : une phase de feu localisé suivie d'une phase de feu enveloppant, comme décrit à la figure 6.

Figure 6
Profil de température pour l'essai de comportement au feu



Le système de stockage d'hydrogène comprimé soumis à l'essai est décrit au paragraphe 6.2.5.1.

Les conditions d'essai et les prescriptions relatives aux protections contre le vent sont définies au paragraphe 6.2.5.2.

Les caractéristiques du système d'alimentation en combustible et le brûleur figurent au paragraphe 6.2.5.3.

On trouvera au paragraphe 6.2.5.4 les prescriptions de l'essai de vérification préalable du fonctionnement du brûleur (niveaux de température).

Les derniers préparatifs de l'essai au feu du système de stockage d'hydrogène comprimé sont décrits aux paragraphes 6.2.5.5 et 6.2.5.6, et la procédure d'essai de feu localisé/enveloppant en deux phases est définie au paragraphe 6.2.5.7.

6.2.5.1 Système de stockage d'hydrogène comprimé soumis à l'essai

Le système de stockage d'hydrogène comprimé soumis à l'essai doit comprendre le réservoir, les dispositifs de fermeture primaire (TPRD, clapet(s) antiretour et vanne(s) d'arrêt) permettant de l'isoler, ainsi que les éventuels accessoires tels que les logements ou barrières susceptibles de gêner le bon fonctionnement des TPRD. Les lignes de mise à l'air libre doivent être raccordées aux TPRD de telle sorte que la direction d'évacuation des gaz soit représentative de la configuration du véhicule.

Au gré du fabricant, le système de stockage d'hydrogène comprimé peut également comprendre des structures, écrans et panneaux ou d'autres dispositifs de sécurité propres au véhicule et destinés à protéger le système de stockage des expositions au feu correspondant aux risques d'incendie caractéristiques de ce véhicule.

6.2.5.2 Conditions d'essai et protections contre le vent

L'essai peut être effectué à l'intérieur ou à l'extérieur.

La température ambiante ainsi que la vitesse et la direction du vent doivent être mesurées et consignées si l'essai se déroule à l'extérieur.

L'essai ne doit pas être effectué à l'extérieur en cas de précipitations (pluie, neige, grésil, etc.), à moins que la zone d'essai, le spécimen d'essai et le brûleur ne soient protégés de telle sorte que les précipitations n'aient pas d'incidence sur le résultat de l'essai.

Des protections contre le vent telles que des murs, clôtures ou enceintes doivent être mises en œuvre sur les sites sensibles aux effets du vent (essai de vérification préalable et essai de comportement au feu du système de stockage d'hydrogène comprimé). La distance entre les pare-vent et le spécimen d'essai (système de stockage ou réservoir d'essai préalable) doit être supérieure ou égale à 0,5 m afin que le tirage du feu ne soit pas perturbé et qu'il soit possible de vérifier la longueur des éventuels jets de flamme. Les pare-vent doivent être munis d'ouvertures (ou d'autres dispositifs) permettant d'alimenter la zone d'essai en air extérieur et d'évacuer les produits de combustion. Avant de procéder à l'essai de comportement au feu du système de stockage d'hydrogène comprimé, il convient de mener un essai préalable afin de vérifier que les pare-vent sont adaptés et respectent les critères figurant au tableau 10.

Note : L'éclatement du réservoir pendant l'essai au feu est susceptible d'entraîner des ondes de souffle, la projection des matériaux et accessoires du réservoir et la libération rapide de l'hydrogène qu'il contient.

Ces effets peuvent se traduire par des mouvements incontrôlés du spécimen d'essai et par des explosions secondaires en raison de l'accumulation de mélanges gazeux inflammables sous haute pression dans la zone d'essai et entre les éventuels pare-vent.

Des mesures correctives doivent être envisagées et mises en œuvre dans le cadre du choix de la zone d'essai (prise en compte de la position des autres équipements) et de la conception et de la construction des éventuelles protections contre le vent et de la structure d'essai afin d'éviter des blessures graves et des dommages matériels inacceptables.

6.2.5.3 Caractéristiques du brûleur

Le brûleur comporte deux parties correspondant respectivement au feu localisé et au feu enveloppant :

- a) La zone de feu localisé, qui est utilisée seule pendant la phase de feu localisé ;
- b) La zone d'extension du feu, qui permet de simuler la propagation du feu de la zone de feu localisé à la zone de feu enveloppant, cette dernière comprenant les deux précédentes.

6.2.5.3.1 Système d'alimentation et de commande du brûleur

Les deux parties du brûleur sont alimentées au GPL.

Les débits de GPL alimentant la zone de feu localisé et la zone d'extension du feu doivent être réglés conformément aux valeurs de flux thermique surfacique (HRR/A) définies au paragraphe 6.2.5.4.5.2.

Les débits de combustibles doivent être relevés toutes les secondes pendant toute la durée des essais.

6.2.5.3.2 Configuration du brûleur

6.2.5.3.2.1 La longueur de la zone de feu localisé (L_{LOC}) est égale à 250 ± 50 mm.

La longueur de la zone d'extension du feu (L_{EXT}) est égale à $1\,400 \pm 50$ mm au maximum. Un brûleur présentant une zone d'extension de longueur égale à la valeur maximale peut être utilisé pour tous les essais de comportement au feu. Le recours à un brûleur présentant une zone d'extension du feu plus courte que la valeur maximale est acceptable si la longueur du brûleur est supérieure

à celle du système de stockage d'hydrogène comprimé lorsqu'il est positionné pour l'essai de comportement au feu.

La longueur de la zone de feu enveloppant (L_{ENG}) est égale à la somme de L_{LOC} et L_{EXT} . Compte tenu de ce qui précède, elle est de $1\,650 \pm 100$ mm au maximum.

La largeur (W) des zones de feu localisé et d'extension du feu est de 500 ± 50 mm, quels que soient le diamètre et la largeur du réservoir.

La configuration et la disposition des buses du brûleur sur les rampes doivent être définies de telle sorte que les valeurs indiquées au tableau 8 soient respectées. Le nombre de buses (N_{LOC} et N_{EXT}) des rampes des zones de feu localisé et d'extension du feu ainsi que l'espacement entre les buses (S_N) doivent être fixés de manière que les longueurs résultantes de ces zones (L_{LOC} et L_{EXT}) respectent les conditions mentionnées ci-dessus. De même, le nombre de rampes (N_R) et l'espacement entre celles-ci (S_R) doivent être arrêtés de telle sorte que la largeur du brûleur satisfasse aux critères ci-dessus.

Notes :

- a) Les longueurs résultantes des zones de feu localisé (L_{LOC}) et d'extension du feu (L_{EXT}) sont respectivement calculées à l'aide des formules suivantes :

$$L_{LOC} = N_{LOC} \times S_N$$

et

$$L_{EXT} = N_{EXT} \times S_N$$

où N_{LOC} est le nombre de buses de la zone de feu localisé, N_{EXT} le nombre de buses de la zone d'extension du feu et S_N l'espacement entre les buses.

De même, la largeur (W) du brûleur est donnée par la formule suivante :

$$W = (N_R - 1) \times S_R$$

où N_R est le nombre de rampes et S_R l'espacement entre celles-ci.

- b) On trouvera des exemples de variantes de brûleur dans la section E de la partie I.
- c) Comme illustré à la figure 9 ci-dessous, les buses situées sur la troisième et quatrième rampes sont destinées à former une « zone haute température » (voir aussi les figures 14 et 15 de la partie I).

Tableau 8
Caractéristiques des buses du brûleur prescrit

<i>Élément</i>	<i>Description</i>
Type de buse	Buses de prémélange pour GPL
– Orifice d'arrivée du GPL	Diamètre interne $1,0 \pm 0,1$ mm
– Orifices d'arrivée d'air	Quatre (4) orifices de diamètre interne $6,4 \text{ mm} \pm 0,6 \text{ mm}$
– Tube mélangeur air/GPL	Diamètre interne 10 ± 1 mm
Nombre de rampes	6
Espacement entre rampes (entraxe)	100 ± 10 mm
Espacement entre buses (entraxe)	50 ± 5 mm

- 6.2.5.3.2.2 Les valeurs de L_{LOC} , L_{EXT} et W indiquées ci-dessus doivent être utilisées pour calculer le flux thermique surfacique (HRR/A) de la zone de feu localisé et de la zone d'extension du feu.

Les limites de ces zones doivent être déterminées à l'aide de L_{LOC} , L_{EXT} et W afin que les spécimens d'essai soient correctement positionnés et orientés pendant l'essai de comportement au feu du système de stockage d'hydrogène comprimé. La limite entre les deux zones du brûleur se trouve à mi-distance entre la dernière rangée de buses de la zone de feu localisé et la première rangée des buses de la zone d'extension du feu ; elle sert de référence pour définir les limites extérieures de ces zones, situées respectivement à L_{LOC} et L_{EXT} . Les deux limites restantes correspondent aux axes longitudinaux des rampes externes du brûleur.

Note : Les limites des zones du brûleur sont illustrées à la figure 17 de la partie I.

- 6.2.5.4 Essai de vérification préalable du brûleur

L'objectif de la vérification préalable est de s'assurer que les deux zones du brûleur fonctionnent correctement et que le montage d'essai, y compris les pare-vent, est fonctionnel et permet d'obtenir des résultats reproductibles avant d'effectuer les essais de comportement au feu du système de stockage d'hydrogène comprimé.

- 6.2.5.4.1 Fréquence d'exécution de l'essai de vérification préalable

L'essai de vérification préalable doit être effectué au moins une fois avant de procéder aux essais de comportement au feu. En cas de modification du brûleur ou le montage d'essai, l'essai de vérification préalable doit être de nouveau exécuté.

- 6.2.5.4.2 Caractéristiques du réservoir d'essai préalable

Un réservoir d'essai préalable de 320 mm de diamètre (tube en acier NPS 12 Schedule 40/DN 300 fermé par des bouchons) est utilisé pour effectuer l'essai de vérification du bon fonctionnement du brûleur.

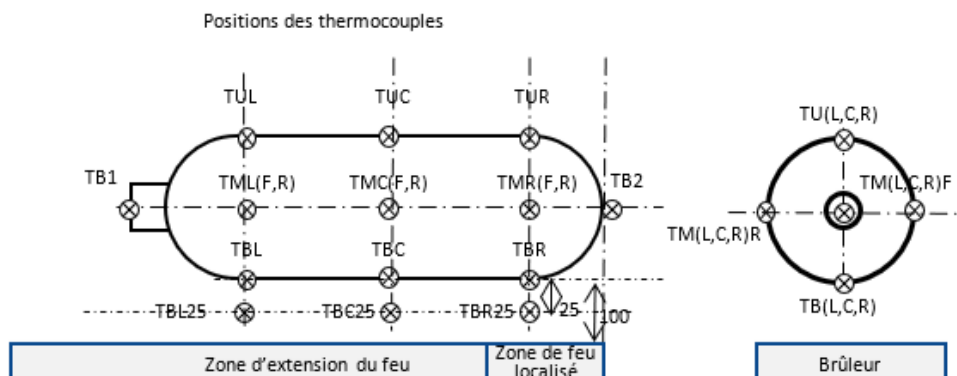
La longueur de la partie cylindrique du réservoir d'essai préalable doit être d'au moins 800 mm et la longueur totale doit être supérieure ou égale à celle du système de stockage d'hydrogène comprimé soumis à l'essai, et inférieure ou égale à la longueur maximale de la zone de feu enveloppant indiquée au paragraphe 6.2.5.3.2.1.

- 6.2.5.4.3 Instrumentation et traitement des données

- 6.2.5.4.3.1 Le réservoir d'essai préalable doit être équipé d'instruments de mesure permettant de vérifier que le brûleur et le montage d'essai permettent d'obtenir des niveaux de température conformes aux prescriptions fonctionnelles relatives aux zones de feu localisé et de feu enveloppant. Les instruments doivent être installés le long de la partie cylindrique du réservoir d'essai préalable de sorte que leurs emplacements correspondent aux zones de feu localisé et de feu enveloppant du système de stockage d'hydrogène comprimé soumis à l'essai. Un jeu d'instruments doit être monté sur la section cylindrique au centre de la zone de feu localisé, et les deux autres jeux doivent être répartis le long de la zone d'extension du feu.

La figure 7 présente une situation courante dans laquelle un réservoir est protégé par un TPRD à une extrémité (à gauche), la zone de feu localisé étant située à l'autre extrémité (à droite). Les températures de surface sont mesurées en trois emplacements le long du réservoir d'essai préalable, sur le dessus, à mi-hauteur et sur le dessous. Le premier emplacement se trouve à l'extrémité droite de la partie cylindrique, au centre de la zone de feu localisé ; le second et le troisième se trouvent au centre et à l'extrémité gauche de la partie cylindrique, ces deux derniers étant situés dans la zone d'extension du feu.

Figure 7
Exemple de positionnement des instruments de mesure sur le réservoir d'essai préalable



Les températures sont mesurées à l'aide de thermocouples chemisés de type K ($\phi \leq 3,2$ mm) installés à moins de 5 mm de la surface du réservoir et maintenus en place par des sangles ou d'autres fixations mécaniques. Les températures mesurées aux emplacements illustrés à la figure 7 sont les suivantes :

- TBR, TBC et TBL sont les températures de surface mesurées sur le dessous du réservoir d'essai préalable (exposition directe à la flamme du brûleur) ;
- TMRF, TMCF, TMLF, TMRR, TMCR et TMLR sont les températures de surface mesurées à mi-hauteur du réservoir d'essai. Les relevés sont exploités uniquement dans le cadre de l'essai préalable de vérification et d'étalonnage des feux localisé et enveloppant ;
- TUR, TUC et TUL sont les températures de surface mesurées sur le dessus du réservoir d'essai préalable (côté opposé à l'exposition directe à la flamme du brûleur) ;

Il est possible de placer d'autres thermocouples au niveau des capteurs des TPRD ou en d'autres points à des fins de diagnostic.

- 6.2.5.4.3.2 Trois (3) thermocouples doivent également être répartis sur toute la longueur du réservoir d'essai préalable, à $25 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ sous celui-ci, afin d'établir des niveaux de température de référence (TBR25, TBC25 et TBL25) pendant l'essai de vérification préalable ; ceux-ci permettront ensuite de surveiller le brûleur pendant l'essai au feu. Les emplacements de ces thermocouples doivent être cohérents avec ceux des instruments de mesure montés sur le réservoir d'essai préalable, comme le montre la figure 7. Il est également possible d'ajouter des thermocouples le long de l'axe longitudinal du brûleur en soutien ou complément des thermocouples mesurant TBR25, TBC25 et TBL25. On trouvera au paragraphe 6.2.5.6 les prescriptions relatives au positionnement des thermocouples destinés à surveiller le brûleur pendant l'essai au feu du système de stockage d'hydrogène comprimé.

Les thermocouples utilisés pour la surveillance du brûleur doivent être des thermocouples chemisés de type K ($\phi \leq 3,2$ mm) non blindés (c'est-à-dire non protégés par des tubes métalliques). La distance entre le réservoir et les thermocouples doit être maintenue à 5 mm près ; il faut donc fixer ces derniers mécaniquement pour éviter tout déplacement ou chute. Dans le cas de systèmes de stockage d'hydrogène comprimé de grande largeur ou de grand diamètre, le montage doit permettre de maintenir l'écartement entre le réservoir et les thermocouples de surveillance du brûleur lorsqu'on ajuste la distance entre le brûleur et le réservoir (voir par. 6.2.5.4.5.5).

6.2.5.4.3.3 Les températures mesurées par les thermocouples sont relevées au moins une fois par seconde puis utilisées pour déterminer les températures suivantes :

- a) La température de la surface inférieure du réservoir d'essai préalable, $T_{B_{LOC}}$, calculée à partir de TBR ;
- b) Les températures de la surface avant du réservoir d'essai préalable, $T_{MF_{LOC}}$, calculées à partir de TMRF ;
- c) Les températures de la surface arrière du réservoir d'essai préalable, $T_{MR_{LOC}}$, calculées à partir de TMRR ;
- d) La température de la surface supérieure du réservoir d'essai préalable, $T_{U_{LOC}}$, calculée à partir de TUR ;
- e) La température du brûleur situé sous le réservoir d'essai préalable (puis sous le système de stockage d'hydrogène comprimé, voir par. 6.2.5.6), $T_{B_{LOC25}}$, calculée à partir de TBR25. Les relevés des thermocouples utilisés en soutien ou complément du thermocouple mesurant TBR25 peuvent également être pris en compte dans le calcul de la température moyenne du brûleur dans la zone de feu localisé. Toute valeur provenant d'un thermocouple endommagé ou défaillant (ou situé hors de la zone de feu localisé) doit être écartée du calcul de la température moyenne du brûleur ;
- f) La température de la surface inférieure du réservoir d'essai préalable pendant la phase de feu enveloppant, $T_{B_{ENG}}$, calculée en faisant la moyenne de TBR, TBC et TBL ;
- g) La température de la surface avant du réservoir d'essai préalable pendant la phase de feu enveloppant, $T_{MF_{ENG}}$, calculée en faisant la moyenne de TMLF, TMLF et TMRF ;
- h) La température de la surface arrière du réservoir d'essai préalable pendant la phase de feu enveloppant, $T_{MR_{ENG}}$, calculée en faisant la moyenne de TMLR, TMCR et TMRR ;
- i) La température de la surface supérieure du réservoir d'essai préalable pendant la phase de feu enveloppant, $T_{U_{ENG}}$, calculée en faisant la moyenne de TUR, TUC et TUL ;
- j) la température du brûleur situé sous le réservoir d'essai préalable (puis sous le système de stockage d'hydrogène comprimé, voir par. 6.2.5.6) pendant la phase de feu enveloppant, $T_{B_{ENG25}}$, calculée en faisant la moyenne de TBR25, TBC25 et TBL25 (températures mesurées par les trois thermocouples prescrits). Les relevés des thermocouples utilisés en soutien ou complément des thermocouples mesurant TBR25, TBC25 et TBL25 peuvent également être pris en compte dans le calcul de la température moyenne du brûleur dans la zone de feu enveloppant. Toute valeur provenant d'un thermocouple endommagé ou défaillant (ou situé hors de la zone de feu enveloppant) doit être écartée du calcul de la température moyenne du brûleur.

6.2.5.4.4 Montage du réservoir d'essai préalable

Le réservoir utilisé pour l'essai de vérification préalable doit être placé à $100 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ au-dessus du brûleur de manière que les buses des deux rampes centrales soient dirigées vers le centre de la partie inférieure du réservoir.

Note : Les schémas des figures 8 et 9 ci-après et la photo de la figure 13 de la partie I illustrent des exemples de montage du réservoir d'essai préalable.

Figure 8
Montage du réservoir d'essai préalable – vue de côté

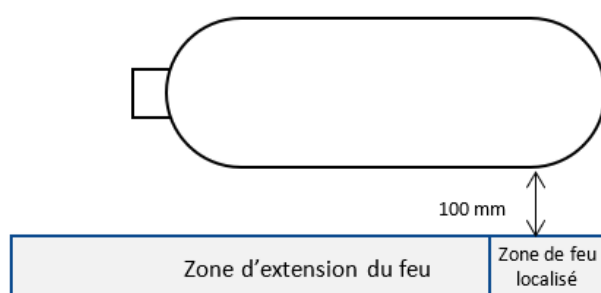
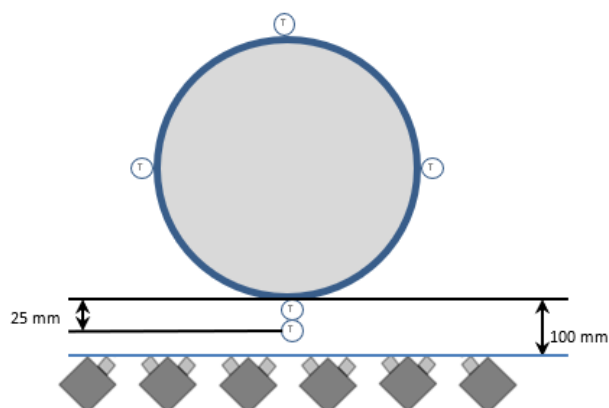


Figure 9
Montage du réservoir d'essai préalable – vue de face



6.2.5.4.5 Procédure de l'essai de vérification préalable

6.2.5.4.5.1 Des pare-vent doivent être installés conformément aux dispositions du paragraphe 6.2.5.2 avant l'essai de vérification préalable.

6.2.5.4.5.2 Le brûleur doit au minimum pouvoir fonctionner à des débits de combustible correspondant au flux thermique surfacique de la phase de feu localisé et de la phase de feu enveloppant. Les valeurs suggérées ainsi que les plages admissibles figurent au tableau 9.

Note : Pendant la phase de feu enveloppant, les flux thermiques surfaciques des deux parties du brûleur doivent correspondre aux valeurs prévues afin que la chaleur émise soit répartie de manière uniforme.

Tableau 9

Plages de fonctionnement admissibles et valeurs suggérées pour les brûleurs prescrits

Phase	Plage de flux thermique surfacique (HRR/A) admissible	Valeur de flux thermique surfacique (HRR/A) suggérée
Feu localisé	200 – 500 kW/m ²	300 kW/m ²
Feu enveloppant	400 – 1 000 kW/m ²	700 kW/m ²

6.2.5.4.5.3 Les moyennes mobiles sur 60 secondes des températures relevées pendant la phase de feu localisé (T_{BLOC} , TMF_{LOC} , TMR_{LOC} et TU_{LOC}) et pendant la phase de feu enveloppant (TBR , TBC , TBL , $TMRF$, $TMCF$, $TMLF$, $TMRR$, $TMCR$, $TMLR$, TUR , TUC et TUL) doivent être conformes aux valeurs du tableau 10 et aux réglages du flux thermique surfacique définis au paragraphe 6.2.5.7.

Tableau 10
Critères d'acceptation des autres configurations de brûleur

<i>Phase</i>	<i>Plage de température admissible : dessous du réservoir d'essai préalable</i>	<i>Plage de température admissible : côtés du réservoir d'essai préalable</i>	<i>Plage de température admissible : dessus du réservoir d'essai préalable</i>
Feu localisé		$TM_{FLOC} < 750 \text{ °C}$ et $450 \text{ °C} < TB_{LOC} < 750 \text{ °C}$	$TU_{LOC} < 300 \text{ °C}$
Feu enveloppant		$TMR_{LOC} < 750 \text{ °C}$	$TU_{ENG} > 100 \text{ °C}$ et $TU_{ENG} < TB_{ENG}$ lorsque $TB_{ENG} > 600 \text{ °C}$ $TU_{ENG} > 750 \text{ °C}$

6.2.5.4.5.4 Les plages de températures admissibles pour le brûleur pendant l'essai ultérieur de comportement au feu du système de stockage d'hydrogène comprimé doivent être déterminées en fonction des résultats de l'essai de vérification préalable :

- La température minimale pendant la phase de feu localisé, $T_{min_{LOC25}}$, est calculée en soustrayant 50 °C à la moyenne mobile sur 60 secondes de TB_{LOC25} . Si le résultat est supérieur à 600 °C, la température minimale pendant la phase de feu localisé est fixée à 600 °C.
- La température minimale pendant la phase de feu enveloppant, $T_{min_{ENG25}}$, est calculée en soustrayant 50 °C à la moyenne mobile sur 60 secondes de TB_{ENG25} . Si le résultat est supérieur à 800 °C, la température minimale pendant la phase de feu enveloppant est fixée à 800 °C.

Si les critères ci-dessus sont satisfaits, on considère que le brûleur est prêt pour l'essai de comportement au feu du système de stockage d'hydrogène comprimé.

6.2.5.4.5.5 Dans le cas contraire, il convient de rechercher les causes du non-respect des prescriptions et d'y remédier puis de procéder à un nouvel essai jusqu'à ce que le problème soit résolu. Il est permis de modifier la hauteur d'installation du réservoir aux fins du respect des plages de fonctionnement admissible indiquées aux tableaux 9 et 10.

Lorsque la largeur ou le diamètre du système de stockage d'hydrogène comprimé sont supérieurs à la largeur du brûleur et que la forme de la partie inférieure du système de stockage (par exemple, une surface plane horizontale, voir figures 30 et 33 de la partie I) empêche les gaz de combustion de s'écouler librement vers le haut et autour de ce dernier pendant l'essai au feu, cela risque d'entraîner une réduction du débit d'air du brûleur telle qu'il soit impossible d'atteindre les températures minimales pendant les phases de feu localisé ou de feu enveloppant de l'essai. Si on s'attend à ce que ce soit le cas (ou si les températures prescrites n'ont pas été atteintes pendant l'essai), il convient de mener les essais préalables supplémentaires suivants afin d'établir la hauteur d'installation adéquate :

- Une plaque d'essai préalable (en acier) de dimensions équivalentes à celle du système de stockage d'hydrogène comprimé (longueur et largeur/diamètre) est installée à 100 mm au-dessus du brûleur.
- Les thermocouples mesurant la température du brûleur décrits au paragraphe 6.2.5.4.3.2 sont installés à $25 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ sous la plaque.

- c) On fait fonctionner le brûleur en mode feu localisé et feu enveloppant (aux HRR/A indiqués ci-dessus) et on relève les températures.
- d) Si les températures du brûleur relevées pendant la phase de feu localisé et la phase de feu enveloppant ne sont pas conformes aux valeurs minimales définies au paragraphe 6.2.5.4.5.4, on augmente de 50 mm la distance entre la plaque et le brûleur et on répète les étapes b) et c) ci-dessus jusqu'à ce que la hauteur adéquate soit atteinte.

Note : Les résultats devraient être satisfaisants à des hauteurs de 200 à 250 mm.

L'essai préalable est terminé et la hauteur adéquate d'installation du système de stockage d'hydrogène comprimé au-dessus du brûleur est établie lorsque les températures du brûleur sont conformes aux valeurs minimales définies ci-dessus pendant la phase de feu localisé et la phase de feu enveloppant.

6.2.5.5 Montage du système de stockage d'hydrogène comprimé au-dessus du brûleur

Une fois que le ou les essais de vérification préalables ont été menés de façon satisfaisante, le système de stockage d'hydrogène comprimé est installé au-dessus du brûleur.

6.2.5.5.1 Hauteur et position du système de stockage d'hydrogène comprimé au-dessus du brûleur

Le système de stockage d'hydrogène comprimé doit être installé au-dessus du brûleur à la hauteur définie au paragraphe 6.2.5.4 et positionné de manière que les buses des deux rampes centrales soient dirigées vers le centre de la partie inférieure du système de stockage. Les figures 10 et 11 illustrent des exemples de montage de réservoirs cylindrique et modulaire, respectivement.

Figure 10
Montage du réservoir cylindrique

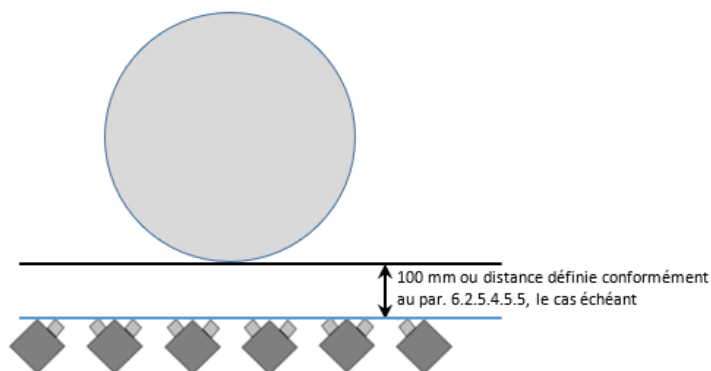
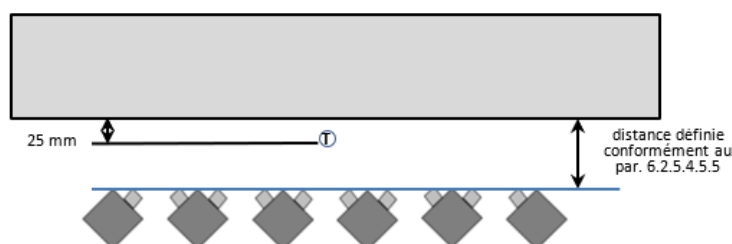


Figure 11
Montage du réservoir modulaire



6.2.5.5.2 Positionnement de la zone de feu localisé et de la zone de feu enveloppant par rapport au système de stockage d'hydrogène comprimé

La zone de feu localisé doit être positionnée sous le système de stockage d'hydrogène comprimé de manière à tester la capacité des TPRD à détecter l'incendie et à se déclencher pour protéger le réservoir.

- a) Lorsque le constructeur du véhicule a choisi de ne pas inclure de dispositifs de sécurité spécifiques au véhicule (tels que définis au paragraphe 6.2.5.1) dans l'essai, le système de stockage d'hydrogène comprimé doit être orienté de manière à limiter la capacité des TPRD à détecter un feu localisé et à se déclencher. Les écrans, panneaux, isolants thermiques enroulés, éléments structurels et autres dispositifs de sécurité doivent être pris en compte lors de la détermination de l'orientation la plus défavorable par rapport à la zone de feu localisé, car les pièces et dispositifs destinés à protéger certaines parties du réservoir peuvent accroître l'exposition d'autres sections ou joints ou réduire la capacité des TPRD à se déclencher.

Lorsque le constructeur du véhicule a choisi d'inclure dans l'essai des dispositifs de sécurité spécifiques au véhicule (tels que définis au paragraphe 6.2.5.1), le système de stockage d'hydrogène comprimé doit être orienté de manière que l'exposition au feu localisé soit la plus défavorable possible.

- b) La zone de feu localisée doit être positionnée sous le système de stockage d'hydrogène comprimé afin que la distance au(x) TPRD le(s) plus proche(s) soit maximale.

La zone d'extension du feu court vers le TPRD (ou point de détection) le plus proche. Elle peut s'étendre au-delà du (des) TPRD si la distance entre la zone de feu localisé et le (les) TPRD est inférieure à la longueur maximale admissible de la zone d'extension du feu définie ci-avant, à savoir 1 400 mm \pm 50 mm.

Note : On trouvera des exemples de situations couramment rencontrées dans l'argumentation (sect. E de la partie I, fig. 28 à 35).

6.2.5.6 Instrumentation et raccordement du système de stockage d'hydrogène comprimé soumis à l'essai

6.2.5.6.1 Les caractéristiques des thermocouples destinés à surveiller le brûleur et les prescriptions relatives à leur positionnement sont analogues à celles qui figurent au paragraphe 6.2.5.4.3.2 (essai de vérification préalable du brûleur). Les figures 10 et 11 illustrent des exemples de montage de réservoirs cylindrique et modulaire, respectivement.

Au moins un thermocouple de surveillance du brûleur doit être installé sous le système de stockage d'hydrogène comprimé dans la zone de feu localisé, et deux dans la zone d'extension du feu. Il est également possible d'ajouter des thermocouples le long de l'axe longitudinal du brûleur en soutien ou complément des trois thermocouples susmentionnés.

6.2.5.6.2 Le mode de calcul des températures du brûleur ($T_{B_{LOC25}}$ et $T_{B_{ENG25}}$) est analogue à celui décrit au paragraphe 6.2.5.4.3.3 (essai de vérification préalable du brûleur).

Il est possible de placer d'autres thermocouples au niveau des capteurs des TPRD ou en d'autres points à des fins de diagnostic.

Avant l'essai, le système de stockage d'hydrogène doit être raccordé à une conduite de fluide permettant de le remplir et de le vidanger.

Cette conduite doit être équipée d'une ou plusieurs vannes d'arrêt afin d'isoler le système de stockage d'hydrogène comprimé pendant l'essai et d'exécuter les procédures de remplissage ou de vidange requises avant ou après l'essai.

Un transmetteur de pression doit être installé sur la conduite afin de pouvoir surveiller à distance la pression du système de stockage pendant l'essai. La précision du transmetteur doit être de $\pm 1\%$ de la pleine échelle et de $\pm 10\%$ à 1 MPa.

6.2.5.7 Procédure d'essai de vérification du comportement au feu du système de stockage d'hydrogène comprimé

6.2.5.7.1 Avant de procéder à l'essai, le système de stockage d'hydrogène comprimé doit être rempli d'hydrogène gazeux à un taux de charge $\geq 100\%$.

6.2.5.7.2 La première étape de l'essai de comportement au feu du système de stockage d'hydrogène comprimé commence par le démarrage de l'alimentation en combustible de la partie du brûleur correspondant à la zone de feu localisé et l'allumage de celle-ci :

- a) On vérifie que la zone de feu localisé du brûleur est allumée, puis on règle le débit de combustible conformément à la valeur de flux thermique surfacique (HRR/A) définie pour la phase de feu localisé au paragraphe 6.2.5.4.5.3, et l'essai commence ($t = 0$).
- b) Comme illustré à la figure 6 du paragraphe 6.2.5, la température moyenne du brûleur (moyenne mobile sur 10 secondes) pendant la phase de feu localisé, $T_{B_{LOC25}}$, doit être au minimum de 300 °C au bout d'une minute et pendant les deux minutes suivantes.

Au bout de trois minutes, la moyenne mobile sur 60 secondes de $T_{B_{LOC25}}$ doit être supérieure à la température minimale $T_{min_{LOC25}}$ définie au paragraphe 6.2.5.4.5.4. Si ce n'est pas le cas, l'essai est arrêté.

Notes :

- i) Il n'est pas obligatoire de continuer à surveiller la moyenne mobile sur 60 secondes de $T_{B_{LOC25}}$ une fois les conditions ci-dessus satisfaites, car les relevés du thermocouple risquent d'être faussés par l'expansion ou la chute de matériaux du système de stockage d'hydrogène comprimé pendant la poursuite de l'essai.
- ii) La valeur de la température en dehors de la zone de feu localisé n'est pas précisée pendant les 10 premières minutes de l'essai.
- iii) Si l'essai est arrêté parce que la température $T_{B_{LOC25}}$ n'a pas atteint la valeur requise au bout du délai prescrit, il convient d'examiner les dispositions du paragraphe 6.2.5.2 relatives aux protections contre le vent et celles du paragraphe 6.2.5.4.5 portant sur le réglage et le montage du brûleur avant de procéder à un nouvel essai.

6.2.5.7.3 La seconde phase de l'essai commence au bout de 10 minutes par le démarrage de l'alimentation en combustible de la zone d'extension du feu et l'allumage de la partie du brûleur correspondante :

- a) On vérifie que la zone d'extension du feu du brûleur est allumée, puis on règle le débit de combustible des deux zones du brûleur conformément à la valeur de flux thermique surfacique (HRR/A) définie pour la phase de feu enveloppant au paragraphe 6.2.5.4.5.3.
- b) Au bout de deux minutes (soit 12 minutes après le début de l'essai), la température moyenne du brûleur (moyenne mobile sur 60 secondes) pendant la phase de feu enveloppant, $T_{B_{ENG25}}$, doit être supérieure à la température minimale $T_{min_{ENG25}}$ définie au paragraphe 6.2.5.4.5.4.

Notes :

- i) Il n'est pas obligatoire de continuer à surveiller la température moyenne du brûleur (moyenne mobile sur 60 secondes) $T_{B_{ENG25}}$ une fois les conditions ci-dessus satisfaites, car les relevés du thermocouple risquent d'être faussés par l'expansion ou la chute de matériaux du système de stockage d'hydrogène comprimé pendant la poursuite de l'essai.
- ii) Si l'essai est arrêté parce que la température $T_{B_{ENG25}}$ n'a pas atteint la valeur requise au bout du délai prescrit, il convient d'examiner les dispositions du paragraphe 6.2.5.2 relatives aux protections contre le vent et celles du paragraphe 6.2.5.4.5 portant sur le réglage et le montage du brûleur avant de procéder à un nouvel essai.

6.2.5.7.4 Un léger déplacement du système de stockage d'hydrogène comprimé dû au déclenchement des TPRD est admis ; dans ce cas, on repositionne correctement le système de stockage par rapport au brûleur.

L'essai au feu se poursuit jusqu'à ce que :

- a) La purge se déclenche et la pression dans le système de stockage d'hydrogène comprimé retombe à moins de 1 MPa ; ou
- b) La durée totale de l'essai atteint une heure pour les voitures particulières et utilitaires légers ou deux heures pour les véhicules utilitaires lourds.

On arrête d'alimenter le brûleur dans un délai d'une minute après la fin de l'essai et on met le système de stockage d'hydrogène comprimé hors pression (si sa pression n'était pas déjà proche de la pression ambiante), puis on le purge avec un gaz inerte afin de pouvoir ensuite le manipuler en toute sécurité.

Note : On trouvera à la section E d) de la partie I des préconisations de données et d'informations techniques à fournir dans le rapport d'essai.

6.2.6 Procédures d'essai de vérification de la durabilité des caractéristiques des dispositifs de fermeture primaire (voir le paragraphe 5.1.5)

L'essai est effectué avec de l'hydrogène ou un gaz inerte répondant aux critères ci-dessous.

L'hydrogène gazeux doit être conforme aux normes ISO 14687:2019 ou SAE J2719_202003 ou satisfaire aux spécifications suivantes :

- a) Pureté de l'hydrogène $\geq 99,97$ % mol
- b) Teneur en autres constituants ≤ 300 $\mu\text{mol/mol}$
- c) Teneur en eau ≤ 5 $\mu\text{mol/mol}$
- d) Teneur en particules ≤ 1 mg/kg

Le gaz d'essai doit être de l'hydrogène, de l'hélium ou un mélange gazeux inerte contenant une quantité détectable d'hydrogène ou d'hélium.

Sauf indication contraire, tous les essais sont menés à une température ambiante de 20 ± 5 °C.

6.2.6.1 Essais de qualification des TPRD du système de stockage d'hydrogène comprimé

6.2.6.1.1 Essai de cycles de pression

Cinq dispositifs de décompression thermocommandés sont soumis à 15 000 cycles de pression interne conformément aux paramètres d'essai définis au tableau 11. À la suite de cet essai, les TPRD doivent satisfaire aux prescriptions de l'essai d'étanchéité (voir par. 6.2.6.1.8), de l'essai de

déclenchement sur banc (voir par. 6.2.6.1.9) et de l'essai de débit (voir par. 6.2.6.1.10). On trouvera au tableau 11 une synthèse des cycles de pression.

Tableau 11
Conditions d'essai des cycles de pression (4 étapes)

Plage de variation de la pression	Nombre de cycles	Température du spécimen d'essai
≤ 2 MPa à ≥ 150 % PSN	10	≥ 85 °C
≤ 2 MPa à ≥ 125 % PSN	2 240	≥ 85 °C
≤ 2 MPa à ≥ 125 % PSN	10 000	20 °C
≤ 2 MPa à ≥ 80 % PSN	2 750	≤ -40 °C

Note : Toutes les étapes de l'essai sont menées à raison de 10 cycles par minutes au maximum.

6.2.6.1.2 Essai de vieillissement accéléré

Huit dispositifs de décompression thermocommandés sont mis à l'essai : trois à la température de déclenchement indiquée par le fabricant, T_f , et cinq à la température d'essai de vieillissement accéléré, T_L , exprimée en °C et donnée

$$\text{par la formule suivante : } T_L = \left(\frac{0,502}{\beta + T_f} + \frac{0,498}{\beta + T_{ME}} \right)^{-1} - \beta$$

où $\beta = 273,15$ °C, $T_{ME} = 85$ °C et T_f est la température de déclenchement indiquée par le fabricant. Les TPRD sont placés dans un four ou dans un bain de liquide et maintenus à température constante (± 1 °C). La pression à l'entrée des dispositifs doit être ≥ 125 % de la PSN. La source de pression peut se trouver à l'extérieur du four ou du bain à température régulée. Chaque dispositif est mis sous pression individuellement ou au moyen d'une rampe de distribution. Dans ce dernier cas, chaque branchement peut comporter un clapet antiretour de façon à éviter une dépressurisation de l'ensemble en cas de défaillance d'un TPRD. Les trois dispositifs mis à l'essai à T_f doivent se déclencher en moins de 10 h. Les cinq dispositifs mis à l'essai à T_L ne doivent pas se déclencher avant 500 h et doivent satisfaire aux prescriptions du paragraphe 6.2.6.1.8 (essai d'étanchéité).

6.2.6.1.3 Essai de cycles de température

- Un TPRD n'étant pas sous pression est placé dans un bain de liquide maintenu à une température ≤ -40 °C pendant au moins 2 h. Il est ensuite transféré dans un bain de liquide maintenu à une température ≥ 85 °C en moins de 5 min et maintenu à cette température pendant au moins 2 h. Ensuite, il est transféré dans un bain de liquide maintenu à une température ≤ -40 °C en moins de 5 min ;
- L'étape a) est répétée de façon à exécuter 15 cycles de température ;
- Après avoir été conditionné pendant au moins 2 h dans le bain de liquide maintenu à une température ≤ -40 °C, le TPRD est soumis à des cycles de pression entre une pression ≤ 2 MPa et une pression ≥ 80 % de la PSN durant 100 cycles, le bain étant maintenu à une température ≤ -40 °C ;
- À la suite des essais de cycles de température et de pression, le dispositif de décompression doit satisfaire aux prescriptions de l'essai d'étanchéité (voir par. 6.2.6.1.8), qui doit être exécuté à une température ≤ -40 °C. Ensuite, le TPRD doit satisfaire aux prescriptions de l'essai de déclenchement sur banc (par. 6.2.6.1.9) puis à celles de l'essai de débit (par. 6.2.6.1.10).

6.2.6.1.4 Essai de résistance à la corrosion saline

L'essai de corrosion accélérée se déroule comme suit :

- a) Trois TPRD sont soumis à un essai de corrosion accélérée en laboratoire, dans des conditions cycliques : exposition à un brouillard salin (solution saline complexe à environ 1 % en poids) en conditions ambiantes, suivie d'une phase humide et d'une phase sèche à haute température. Chaque cycle se déroule sur 24 h, comme indiqué au tableau 12 ;

Tableau 12

Conditions de l'essai de corrosion accélérée (1 cycle = 24 h)

<i>Phases du cycle</i>	<i>Température (°C)</i>	<i>Humidité relative (%)</i>	<i>Durée de la phase</i>
Conditions ambiantes	25 ± 3	45 ± 10	8 h ± 10 min
Phase de transition (1 h ± 5 min)			
Phase humide	49 ± 2	100	7 h ± 10 min
Phase de transition (3 h ± 10 min)			
Phase sèche	60 ± 2	≤ 30	5 h ± 10 min

- b) L'appareillage comporte une enceinte à atmosphère contrôlée ou de brouillard salin, une alimentation en eau conforme aux prescriptions de la norme ASTM D1193-06(2018) (eau de qualité réactif de type IV), un système de chauffage de l'enceinte et un dispositif permettant de faire varier la température entre 22 °C et 62 °C. Il doit également comprendre une alimentation en air comprimé correctement conditionné et une ou plusieurs buses de génération de brouillard. La ou les buses doivent être orientées de telle sorte que le brouillard ne soit pas pulvérisé directement sur les échantillons d'essai, ou être munies de déflecteurs ;
- c) La conception de l'enceinte doit satisfaire aux dispositions de la norme ISO 6270-2:2017 (humidité générée par un réservoir à eau chauffée). Des gouttelettes d'eau doivent être visibles sur les échantillons pendant la phase humide ;
- d) Il est possible d'utiliser de la vapeur pour générer l'humidité, à condition que l'eau utilisée à cet effet soit exempte d'inhibiteurs de corrosion. Des gouttelettes d'eau doivent être visibles sur les échantillons pendant la phase humide ;
- e) L'appareil doit être capable de créer et de maintenir les conditions suivantes : température de 60 ± 2 °C et HR ≤ 30 %. La circulation d'air doit être suffisante pour éviter la stratification thermique et pour permettre le séchage complet des échantillons d'essai ;
- f) La force du jet de pulvérisation ou le contact direct avec celui-ci ne doit pas éliminer la corrosion ou endommager le revêtement ou la peinture des échantillons ;
- g) La composition de la solution saline complexe est la suivante :
- i) Chlorure de sodium (NaCl) : 0,9 % en poids ;
 - ii) Chlorure de calcium (CaCl₂) : 0,1 % en poids ;
 - iii) Bicarbonate de sodium (NaHCO₃) : 0,075 % en poids.

Le chlorure de sodium doit être de qualité réactif ou alimentaire. Le chlorure de calcium doit être de qualité réactif. Le bicarbonate de sodium doit être de qualité réactif ou alimentaire (par exemple, le bicarbonate de sodium utilisé comme levure chimique ou un produit comparable sont acceptables). L'eau doit satisfaire aux prescriptions de la norme ASTM D1193-06(2018) (eau de qualité réactif de type IV).

Note : Le CaCl_2 et le NaHCO_3 doivent être dissous dans l'eau avant d'être ajoutés à la solution. Si tous les ingrédients sont ajoutés sous forme solide, un précipité insoluble risque de se former.

- h) Les TPRD doivent être installés conformément à la procédure recommandée par le fabricant et soumis à l'essai de corrosion accélérée en conditions cycliques décrit au tableau 12 ;
- i) Le cycle de 24 h doit être répété 100 fois. Lors des phases d'exposition au brouillard salin, la solution doit être pulvérisée de sorte que la totalité de la surface des échantillons d'essai soit mouillée ou que le liquide s'égoutte. Parmi les techniques de pulvérisation adaptées, on peut citer l'utilisation d'une bouteille en plastique ou d'un pulvérisateur à siphon alimenté à débit régulé par de l'air exempt d'huile. La quantité de brouillard appliqué doit être suffisante pour éliminer de manière visible le sel accumulé sur la surface pendant les expositions précédentes. Les échantillons d'essai sont exposés quatre fois au brouillard salin, uniquement en conditions ambiantes. La première exposition a lieu au début de la phase en conditions ambiantes. Les expositions ultérieures ont lieu à des intervalles d'environ 90 minutes, afin de laisser aux échantillons le temps de sécher. S'il est nécessaire d'interrompre l'essai (week-ends et vacances), les échantillons d'essai doivent être maintenus à une température ambiante de 25 ± 3 °C et à une humidité relative de 45 ± 10 %. L'essai reprend en conditions ambiantes ;
- j) La vitesse de variation de l'humidité entre les conditions ambiantes et la phase humide et entre la phase humide et la phase sèche peut avoir une incidence importante sur les résultats de l'essai, car c'est pendant ces phases de transition que la vitesse de corrosion est la plus élevée. La durée de la transition entre les conditions ambiantes et la phase humide doit être de 60 ± 5 min, et de 180 ± 10 min entre la phase humide et la phase sèche ;
- k) Immédiatement après l'essai de corrosion, on rince les échantillons à l'eau du robinet et on les laisse sécher avant de les examiner ;
- l) Les TPRD doivent ensuite satisfaire aux prescriptions de l'essai d'étanchéité (voir par. 6.2.6.1.8), de l'essai de déclenchement sur banc (voir par. 6.2.6.1.9) et de l'essai de débit (voir par. 6.2.6.1.10).

6.2.6.1.5 Essai d'exposition aux agents chimiques présents dans l'environnement routier

On évalue la résistance de la surface extérieure du spécimen d'essai à l'exposition aux fluides automobiles en exécutant l'essai ci-après :

- a) Les orifices d'entrée et de sortie du dispositif de décompression thermocommandé sont raccordés ou obturés conformément aux instructions du fabricant. La surface extérieure du TPRD est exposée durant 24 h à température ambiante à chacun des fluides ci-après :
 - i) Acide sulfurique en solution aqueuse à 19 % en volume ;
 - ii) Éthanol dilué dans de l'essence à 10 % en volume (E10) ;
 - iii) Méthanol en solution aqueuse à 50 % en volume (liquide lave-glace).

Si nécessaire, on ajoute du fluide pour que le spécimen d'essai reste immergé pendant toute la durée de l'essai. Chaque fluide fait l'objet d'un essai distinct. Un même TPRD peut être exposé successivement à tous les fluides ;

- b) Le TPRD est essuyé et rincé à l'eau après chaque exposition ;
- c) Le TPRD ne doit présenter aucun signe de détérioration physique susceptible de compromettre son bon fonctionnement, comme des fissures, un ramollissement ou des cloques ; les altérations superficielles telles que les piqûres ou les taches ne sont pas prises en considération. À la suite de cet essai, le TPRD doit satisfaire aux prescriptions de l'essai d'étanchéité (voir par. 6.2.6.1.8), de l'essai de déclenchement sur banc (voir par. 6.2.6.1.9) et de l'essai de débit (voir par. 6.2.6.1.10).

6.2.6.1.6 Essai de fissuration par corrosion sous contrainte

Cet essai est applicable uniquement aux TPRD contenant des pièces en alliages de cuivre qui sont exposées à l'environnement extérieur. Il est possible de mener cet essai en absence d'information sur la présence d'alliages de cuivre.

Dans le cas des TPRD contenant des pièces en alliages de cuivre (laiton, par exemple), un seul échantillon est soumis à l'essai. Toutes les pièces en alliages de cuivre qui sont en contact avec l'atmosphère sont dégraissées puis installées dans une chambre en verre fermée par un couvercle en verre et exposées en continu pendant au moins 10 jours à un brouillard d'ammoniac.

On verse une solution aqueuse d'ammoniac de densité relative de 0,94 au fond de la chambre en verre ; la quantité de solution doit être supérieure ou égale à 2 % du volume de la chambre. L'échantillon est placé à 35 ± 5 mm au-dessus de la solution aqueuse d'ammoniac, sur un plateau en matériau inerte. Le brouillard d'ammoniac est maintenu à la pression atmosphérique, à une température de 35 ± 5 °C. Les pièces en alliage de cuivre ne doivent présenter ni fissures ni délamination à la fin de l'essai.

6.2.6.1.7 Essai de chute et de vibration

- a) Plusieurs TPRD représentatifs de la forme finie du produit sont lâchés d'une hauteur ≥ 2 m (chute libre sous l'effet de la gravité), à température ambiante sur un sol en béton lisse sur lequel ils peuvent rebondir.

Il est possible d'utiliser six spécimens d'essai, soit un par orientation de chute (dans les deux sens selon les trois axes orthogonaux du spécimen, à savoir l'axe vertical, l'axe latéral et l'axe longitudinal). Les essais de conformité peuvent être conduits selon l'une quelconque de ces orientations. Au choix du constructeur, on peut également laisser tomber un seul spécimen selon les six orientations.

L'intégrité du spécimen doit être vérifiée visuellement après chaque chute. Si l'échantillon ne présente aucun dommage extérieur indiquant qu'il est inutilisable (par exemple, filetage trop endommagé pour permettre le montage), on passe à l'étape b).

Note : S'il est impossible d'installer le TPRD en raison des dégâts provoqués par la chute (par exemple, filetage abîmé), on ne passe pas à l'étape b) et on ne considère pas que l'échantillon a échoué à l'essai.

- b) Les échantillons soumis à l'essai de chute mentionné sous a) qui ne présentent pas de dommages visibles plus un autre échantillon qui n'a pas été soumis à l'essai de chute sont placés sur un montage d'essai conformément aux instructions d'installation du fabricant et soumis à des vibrations pendant 30 min selon leurs trois axes orthogonaux (axe

vertical, axe latéral et axe longitudinal), à la fréquence de résonance correspondant à l'amplitude de vibration maximale pour chaque axe.

On détermine ces fréquences en appliquant une accélération de 1,5 g et en balayant en 10 minutes une plage de fréquences sinusoïdales comprises entre 10 et 500 Hz. La fréquence de résonance se reconnaît à une augmentation marquée de l'amplitude des vibrations. Si aucune fréquence de résonance n'est mise en évidence dans la plage ci-dessus, l'essai est effectué à une fréquence de 40 Hz.

Les échantillons doivent ensuite satisfaire aux prescriptions de l'essai d'étanchéité (par. 6.2.6.1.8), de l'essai déclenchement sur banc (par. 6.2.6.1.9) et de l'essai de débit (par. 6.2.6.1.10).

6.2.6.1.8 Essai d'étanchéité

Cet essai s'applique à un TPRD qui n'a pas subi les essais de qualification précédents et aux TPRD supplémentaires mentionnés dans les autres essais figurant au paragraphe 6.2.6.1. L'essai d'étanchéité est conduit à température ambiante, à haute température et à basse température. Avant l'essai, le spécimen d'essai doit être mis à la température requise et soumis à une pression ≥ 2 MPa pendant au moins une heure afin de le stabiliser thermiquement. L'orifice d'entrée du TPRD est mis sous pression avec du gaz d'essai. L'essai se déroule comme suit :

- a) Phase à température ambiante : on conditionne l'échantillon à température ambiante ; on le soumet ensuite à une pression égale à $2 \pm 0,5$ MPa puis à une pression ≥ 125 % de la PSN ;
- b) Phase à haute température : on conditionne l'échantillon à une température ≥ 85 °C ; on le soumet ensuite à une pression égale à $2 \pm 0,5$ MPa puis à une pression ≥ 125 % de la PSN ;
- c) Phase à basse température : on conditionne l'échantillon à une température ≤ -40 °C ; on le soumet ensuite à une pression égale à $2 \pm 0,5$ MPa puis à une pression ≥ 100 % de la PSN.

Pour chaque phase, une fois l'échantillon mis à la température d'essai, on l'immerge dans un fluide à température contrôlée (ou équivalent) en appliquant la pression d'essai correspondante pendant au moins une minute. Si aucune bulle n'est observée pendant la période de temps prescrite, l'échantillon a subi l'essai avec succès. En revanche, si des bulles apparaissent, le débit de fuite doit être mesuré. Le débit de fuite total doit être inférieur à 10 Nml/h pour l'hydrogène.

6.2.6.1.9 Essai de déclenchement sur banc

Trois TPRD neufs (qui n'ont pas subi d'autres essais de qualification) sont soumis à cet essai afin d'établir un délai de déclenchement de référence, qui est égal à la moyenne du délai de déclenchement de ces trois spécimens. Cinq autres échantillons ayant déjà subi des essais (menés conformément aux dispositions des paragraphes 6.2.6.1.1, 6.2.6.1.3, 6.2.6.1.4, 6.2.6.1.5 et 6.2.6.1.7) sont soumis à l'essai de déclenchement au banc comme indiqué dans les autres essais visés au paragraphe 6.2.6.1 :

- a) Le montage d'essai se compose d'un four ou d'une cheminée dont il est possible de réguler le débit d'air et la température de sorte que la température de l'air au voisinage du TPRD soit égale à 600 ± 10 °C. L'échantillon n'est pas exposé directement à la flamme. Il est installé dans le montage d'essai conformément aux instructions du fabricant, et la configuration d'essai est consignée ;
- b) Un thermocouple est placé dans le four ou la cheminée pour surveiller la température, qui doit se situer dans la plage admissible au moins 2 min avant le début de l'essai ;

- c) Avant d'être placé dans le four ou la cheminée, le TPRD est mis sous pression, à $2 \pm 0,5$ MPa ;
- d) Le TPRD sous pression est introduit dans le four ou la cheminée, et son délai de déclenchement est enregistré ;
- e) Le délai de déclenchement des dispositifs de décompression précédemment soumis aux autres essais du paragraphe 6.2.6.1 ne doit pas dépasser de plus de 2 min le délai de déclenchement de référence ;
- f) L'écart maximal entre les délais de déclenchement des trois échantillons neufs ne doit pas être supérieur à 2 min.

6.2.6.1.10 Essai de débit

- a) Huit TPRD sont soumis à l'essai de débit, dont trois échantillons neufs, plus cinq échantillons déjà soumis aux essais des paragraphes 6.2.6.1.1, 6.2.6.1.3, 6.2.6.1.4, 6.2.6.1.5 et 6.2.6.1.7, respectivement ;
- b) On déclenche chaque échantillon conformément aux dispositions du paragraphe 6.2.6.1.9. Chaque échantillon, sans nettoyage, démontage ni reconditionnement préalable, est ensuite soumis à l'essai de débit ;c) La pression d'entrée est de $2 \pm 0,5$ MPa, la pression de sortie est égale à la pression ambiante. La pression d'entrée et le débit sont enregistrés ;
- d) Le débit est mesuré avec une précision de 2 %. La valeur la plus basse doit être supérieure ou égale à 90 % de la valeur la plus élevée.

6.2.6.1.11 Essai d'exposition aux agents atmosphériques

L'essai d'exposition aux agents atmosphériques s'applique à la qualification des TPRD si l'échantillon contient des matériaux non métalliques qui sont en contact avec l'atmosphère dans les conditions normales de fonctionnement.

- a) Les matériaux non métalliques assurant l'étanchéité qui sont exposés aux agents atmosphériques et pour lesquels aucune déclaration de propriétés satisfaisante n'a été déposée par le demandeur ne doivent présenter aucune fissure et aucun signe visible de détérioration après avoir été exposés à l'oxygène pendant au moins 96 h à une température de 70 °C sous une pression de 2 MPa, conformément aux normes ISO 188:2011 ou ASTM D572-04(2019) ;
- b) La résistance à l'ozone de tous les élastomères exposés à l'atmosphère doit être prouvée à l'aide d'au moins l'une des deux méthodes suivantes :
 - i) Détermination de la résistance à l'ozone de chacun de leurs composés ;
 - ii) Essai des composants conformément aux normes ISO 1431-1:2012 ou ASTM D1149-18 ou selon une méthode d'essai équivalente ;
 - iii) L'échantillon doit subir une élongation sous contrainte de 20 % et être exposé à de l'air à 40 °C ayant une teneur en ozone de 50 parties par centaine de millions pendant 120 h. Les parties non métalliques de l'échantillon ne doivent présenter aucune fissure et aucun signe visible de détérioration après exposition à l'ozone.

6.2.6.2 Essais de qualification des clapets antiretour et des vannes d'arrêt destinés aux systèmes de stockage d'hydrogène comprimé

6.2.6.2.1 Essai de résistance hydrostatique

L'orifice de sortie du spécimen d'essai (clapet ou vanne) est obturé et ses organes internes sont bloqués en position ouverte. Un échantillon neuf (qui n'a pas subi d'autres essais de qualification) est soumis à l'essai afin d'établir une

pression d'éclatement de référence. D'autres échantillons sont soumis aux essais décrits dans le paragraphe 6.2.6.2.

- a) Une pression hydrostatique ≥ 250 % de la PSN est appliquée à l'entrée du clapet ou de la vanne pendant au moins 3 min. Le spécimen est ensuite examiné pour s'assurer qu'il n'a pas éclaté ;
- b) On augmente la pression hydrostatique à une vitesse $\leq 1,4$ MPa/s jusqu'à défaillance du spécimen et on consigne la pression d'éclatement. La pression d'éclatement des échantillons ayant déjà subi des essais doit être ≥ 80 % de la pression d'éclatement de référence, sauf si la pression hydrostatique appliquée est supérieure à 400 % de la PSN.

6.2.6.2.2 Essai d'étanchéité

Cet essai s'applique à un spécimen qui n'a pas subi les essais de qualification précédents et aux spécimens supplémentaires mentionnés dans les autres essais figurant au paragraphe 6.2.6.2. L'essai d'étanchéité est conduit à température ambiante, à haute température et à basse température. Avant l'essai, le spécimen d'essai doit être mis à la température requise et soumis à une pression ≥ 2 MPa pendant au moins une heure afin de le stabiliser thermiquement. L'orifice de sortie de l'échantillon est obturé et l'orifice d'entrée est mis sous pression avec du gaz d'essai. Les conditions d'essai sont les suivantes :

- a) Phase à température ambiante : on conditionne l'échantillon à 20 ± 5 °C ; on le soumet ensuite à une pression égale à $2 \pm 0,5$ MPa puis à une pression ≥ 125 % de la PSN ;
- b) Phase à haute température : on conditionne l'échantillon à une température ≥ 85 °C ; on le soumet ensuite à une pression égale à $2 \pm 0,5$ MPa puis ≥ 125 % de la PSN ;
- c) Phase à basse température : on conditionne l'échantillon à une température ≤ -40 °C ; on le soumet ensuite à une pression égale à $2 \pm 0,5$ MPa puis à une pression ≥ 100 % de la PSN.

Pour chaque phase, une fois l'échantillon mis à la température d'essai, on l'immerge dans un fluide à température contrôlée (ou équivalent) en appliquant la pression d'essai correspondante pendant au moins une minute. Si aucune bulle n'est observée pendant la période de temps prescrite, l'échantillon a subi l'essai avec succès. En revanche, si des bulles apparaissent, le débit de fuite doit être mesuré. Le débit de fuite total doit être inférieur à 10 Nml/h pour l'hydrogène.

6.2.6.2.3 Essai de cycles de pression à des températures extrêmes

Le nombre total de cycles est fixé à 15 000 pour les clapets antiretour et à 50 000 pour les vannes d'arrêt. L'échantillon est placé dans un montage d'essai conforme aux instructions d'installation du fabricant.

- a) On soumet de manière continue le spécimen d'essai à des cycles de fonctionnement avec de l'hydrogène gazeux ou un gaz inerte à toutes les températures et pressions prescrites.
 - i) Cycles à température ambiante. Le spécimen d'essai stabilisé à température ambiante est soumis à des cycles de fonctionnement à une pression ≥ 100 % de la PSN pendant 90 % du nombre total de cycles.
 - ii) Cycles à haute température. Le spécimen d'essai stabilisé à une température ≥ 85 °C est ensuite soumis à des cycles de fonctionnement à une pression ≥ 125 % de la PSN pendant 5 % du nombre total de cycles.

iii) Cycles à basse température. Le spécimen d'essai stabilisé à une température ≤ -40 °C est enfin soumis à des cycles de fonctionnement à une pression ≥ 80 % de la PSN pendant 5 % du nombre total de cycles.

b) Les échantillons doivent satisfaire aux prescriptions suivantes :

i) Clapet antiretour. Le clapet antiretour doit pouvoir supporter 15 000 cycles de fonctionnement et au moins 24 h d'application du débit provoquant le battement selon la procédure décrite ci-dessous.

Le clapet antiretour doit être raccordé à un montage d'essai. L'orifice d'entrée est soumis à six reprises à l'impulsion de pression prescrite, l'orifice de sortie étant obturé. On laisse ensuite la pression à l'orifice d'entrée retomber à la pression atmosphérique. Si le clapet antiretour ne se referme pas de manière à éviter le reflux du gaz, on considère qu'il ne satisfait pas aux critères de l'essai. Dans ce cas, on réduit la pression appliquée sur l'orifice de sortie du clapet antiretour afin qu'elle soit ≤ 60 % de la PSN avant le cycle suivant ;

Une fois les cycles de fonctionnement terminés, le clapet antiretour est soumis pendant 24 h au débit causant l'effet de battement maximum.

Une fois l'essai achevé, le clapet antiretour doit subir avec succès l'essai d'étanchéité (par. 6.2.6.2.2) et l'essai de résistance hydrostatique (par. 6.2.6.2.1).

ii) Vanne d'arrêt. La vanne d'arrêt doit pouvoir supporter 50 000 cycles de fonctionnement selon la procédure décrite ci-dessous.

La vanne d'arrêt doit être raccordée à un montage d'essai adapté. Un cycle de fonctionnement comprend les étapes suivantes : on remplit le montage d'essai via l'orifice d'entrée de la vanne jusqu'à ce que la pression requise soit atteinte ; on ouvre la vanne d'arrêt en la mettant sous tension ; la pression doit retomber à 50 % de la pression de remplissage ; on ferme la vanne d'arrêt en la mettant hors tension avant le début du cycle suivant.

Une fois les cycles de fonctionnement terminés, si la vanne d'arrêt sert de clapet antiretour pendant le remplissage, elle doit être soumise pendant 24 h à un essai de battement à un débit compris dans la plage de fonctionnement normal.

Note : Si les débits correspondant à la plage de fonctionnement normal n'induisent pas d'effet de battement, il n'est pas nécessaire de mener l'essai de battement.

Une fois l'essai achevé, la vanne d'arrêt doit subir avec succès l'essai d'étanchéité (par. 6.2.6.2.2) et l'essai de résistance hydrostatique (par. 6.2.6.2.1).

6.2.6.2.4 Essai de résistance à la corrosion saline

L'essai de corrosion accélérée se déroule comme suit :

a) Trois spécimens sont soumis à un essai de corrosion accélérée en laboratoire, dans des conditions cycliques : exposition à un brouillard salin (solution saline complexe à environ 1 %) en conditions ambiantes, suivie d'une phase humide et d'une phase sèche à haute température. Chaque cycle se déroule sur 24 h, comme indiqué au tableau 13 ;

Tableau 13
Conditions de l'essai de corrosion accélérée (1 cycle = 24 h)

<i>Phases du cycle</i>	<i>Température (°C)</i>	<i>Humidité relative (%)</i>	<i>Durée de la phase</i>
Conditions ambiantes	25 ± 3	45 ± 10	8 h ± 10 min
Phase de transition (1 h ± 5 min)			
Phase humide	49 ± 2	100	7 h ± 10 min
Phase de transition (3 h ± 10 min)			
Phase sèche	60 ± 2	≤ 30	5 h ± 10 min

- b) L'appareillage comporte une enceinte à atmosphère contrôlée ou de brouillard salin, une alimentation en eau conforme aux prescriptions de la norme ASTM D1193-06(2018) (eau de qualité réactif de type IV), un système de chauffage de l'enceinte et un dispositif permettant de faire varier la température entre 22 °C et 62 °C. Il doit également comprendre une alimentation en air comprimé correctement conditionné et une ou plusieurs buses de génération de brouillard. La ou les buses doivent être orientées de telle sorte que le brouillard ne soit pas pulvérisé directement sur les échantillons d'essai, ou être munies de déflecteurs ;
- c) La conception de l'enceinte doit satisfaire aux dispositions de la norme ISO 6270-2:2017 (humidité générée par un réservoir à eau chauffée). Des gouttelettes d'eau doivent être visibles sur les échantillons pendant la phase humide ;
- d) Il est possible d'utiliser de la vapeur pour générer l'humidité, à condition que l'eau utilisée à cet effet soit exempte d'inhibiteurs de corrosion. Des gouttelettes d'eau doivent être visibles sur les échantillons pendant la phase humide ;
- e) L'appareil doit être capable de créer et de maintenir les conditions suivantes : température de 60 ± 2 °C et HR ≤ 30 %. La circulation d'air doit être suffisante pour éviter la stratification thermique et pour permettre le séchage complet des échantillons d'essai ;
- f) La force du jet de pulvérisation ou le contact direct avec celui-ci ne doit pas éliminer la corrosion ou endommager le revêtement ou la peinture des échantillons ;
- g) La composition de la solution saline complexe est la suivante :
- i) Chlorure de sodium (NaCl) : 0,9 % en poids ;
 - ii) Chlorure de calcium (CaCl₂) : 0,1 % en poids ;
 - iii) Bicarbonate de sodium (NaHCO₃) : 0,075 % en poids.

Le chlorure de sodium doit être de qualité réactif ou alimentaire. Le chlorure de calcium doit être de qualité réactif. Le bicarbonate de sodium doit être de qualité réactif ou alimentaire (par exemple, le bicarbonate de sodium utilisé comme levure chimique ou un produit comparable sont acceptables). L'eau doit satisfaire aux prescriptions de la norme ASTM D1193-06(2018) (eau de qualité réactif de type IV).

Note : Le CaCl₂ et le NaHCO₃ doivent être dissous dans l'eau avant d'être ajoutés à la solution. Si tous les ingrédients sont ajoutés sous forme solide, un précipité insoluble risque de se former.

- h) Les spécimens d'essai doivent être installés conformément à la procédure recommandée par le fabricant et soumis à l'essai de corrosion accélérée en conditions cycliques décrit au tableau 13 ;

- i) Le cycle de 24 h doit être répété 100 fois. Lors des phases d'exposition au brouillard salin, la solution doit être pulvérisée de sorte que la totalité de la surface des échantillons d'essai soit mouillée ou que le liquide s'égoutte. Parmi les techniques de pulvérisation adaptées, on peut citer l'utilisation d'une bouteille en plastique ou d'un pulvérisateur à siphon alimenté à débit régulé par de l'air exempt d'huile. La quantité de brouillard appliqué doit être suffisante pour éliminer de manière visible le sel accumulé sur la surface pendant les expositions précédentes. Les échantillons d'essai sont exposés quatre fois au brouillard salin, uniquement en conditions ambiantes. La première exposition a lieu au début de la phase en conditions ambiantes. Les expositions ultérieures ont lieu à des intervalles d'environ 90 minutes, afin de laisser aux échantillons le temps de sécher. S'il est nécessaire d'interrompre l'essai (week-ends et vacances), les échantillons d'essai doivent être maintenus à une température ambiante de 25 ± 3 °C et à une humidité relative de 45 ± 10 %. L'essai reprend en conditions ambiantes ;
- j) La vitesse de variation de l'humidité entre les conditions ambiantes et la phase humide et entre la phase humide et la phase sèche peut avoir une incidence importante sur les résultats de l'essai, car c'est pendant ces phases de transition que la vitesse de corrosion est la plus élevée. La durée de la transition entre les conditions ambiantes et la phase humide doit être de 60 ± 5 min, et de 180 ± 10 min entre la phase humide et la phase sèche ;
- k) Immédiatement après l'essai de corrosion, l'échantillon est rincé à l'eau du robinet ; on le laisse ensuite sécher avant de l'examiner ;
- l) L'échantillon doit ensuite subir avec succès l'essai d'étanchéité (par. 6.2.6.2.2) et l'essai de résistance hydrostatique (par. 6.2.6.2.1).

6.2.6.2.5 Essai d'exposition aux agents chimiques présents dans l'environnement routier

On évalue la résistance de la surface extérieure du spécimen d'essai à l'exposition aux fluides automobiles en exécutant l'essai ci-après :

- a) Les orifices d'entrée et de sortie du spécimen d'essai (clapet antiretour ou vanne d'arrêt) sont raccordés ou obturés conformément aux instructions du fabricant. La surface extérieure du spécimen est exposée durant 24 h à température ambiante à chacun des fluides ci-après :
 - i) Acide sulfurique en solution aqueuse à 19 % en volume ;
 - ii) Éthanol dilué dans de l'essence à 10 % en volume (E10) ;
 - iii) Méthanol en solution aqueuse à 50 % en volume (liquide lave-glace).

Si nécessaire, on ajoute du fluide pour que le spécimen d'essai reste immergé pendant toute la durée de l'essai. Chaque fluide fait l'objet d'un essai distinct. Un même échantillon peut être exposé successivement à tous les fluides.

- b) Le spécimen d'essai est essuyé et rincé à l'eau après chaque exposition ;
- c) Le spécimen d'essai ne doit pas présenter de signes d'une dégradation physique qui pourrait nuire à son fonctionnement, comme des fissures, un ramollissement ou des cloques ; les altérations superficielles telles que les piqûres ou les taches ne sont pas prises en considération. À la suite de cet essai, le ou les échantillons doivent satisfaire aux prescriptions de l'essai d'étanchéité (par. 6.2.6.2.2) et à l'essai de résistance hydrostatique (par. 6.2.6.2.1).

6.2.6.2.6 Essai d'exposition aux agents atmosphériques

L'essai d'exposition aux agents atmosphériques s'applique à la qualification des clapets antiretour et des vannes d'arrêt si l'échantillon contient des matériaux non métalliques qui sont en contact avec l'atmosphère dans les conditions normales de fonctionnement.

- a) Les matériaux non métalliques assurant l'étanchéité qui sont exposés aux agents atmosphériques et pour lesquels aucune déclaration de propriétés satisfaisante n'a été déposée par le demandeur ne doivent présenter aucune fissure et aucun signe visible de détérioration après avoir été exposés à l'oxygène pendant au moins 96 h à une température de 70 °C sous une pression de 2 MPa, conformément aux normes ISO 188:2011 ou ASTM D572-04(2019) ;
- b) La résistance à l'ozone de tous les élastomères doit être prouvée à l'aide d'au moins l'une des deux méthodes suivantes :
 - i) Détermination de la résistance à l'ozone de chacun de leurs composés ;
 - ii) Essai des composants conformément aux normes ISO 1431-1:2012 ou ASTM D1149-18 ou selon une méthode d'essai équivalente ;
 - iii) L'échantillon doit subir une elongation sous contrainte de 20 % et être exposé à de l'air à 40 °C ayant une teneur en ozone de 50 parties par centaine de millions pendant 120 h. Les parties non métalliques de l'échantillon ne doivent présenter aucune fissure et aucun signe visible de détérioration après exposition à l'ozone.

6.2.6.2.7 Essais électriques

Les essais électriques s'appliquent à la qualification des vannes d'arrêt mais pas à celle des clapets antiretour.

- a) Essai sous tension anormale. L'essai se déroule comme suit, l'électrovanne étant raccordée à une source de courant continu à tension variable :
 - i) L'électrovanne est maintenue à température constante (état stationnaire) pendant au moins une heure, à une tension $\geq 1,5$ fois la tension nominale ;
 - ii) La tension est ensuite portée à une valeur ≥ 2 fois la tension nominale ou à 60 V, si cette dernière valeur est inférieure, et cette tension est maintenue pendant au moins une minute ;
 - iii) Aucune défaillance ne doit pouvoir entraîner une fuite externe de la vanne (voir par. 6.2.6.2.2), une ouverture non voulue de la vanne ou une situation dangereuse (par exemple, dégagement de fumée, incendie ou fusion) ;
- b) Essai de résistance d'isolement. Un courant continu d'une tension de 1 000 V est appliqué entre la borne d'alimentation et le boîtier de la vanne pendant au moins 2 s. La résistance minimale admissible est de 240 k Ω .

6.2.6.2.8 Essai de vibration

Le spécimen d'essai (vanne d'arrêt ou clapet antiretour) est soumis à une pression ≥ 100 % de la PSN, obturé à ses deux extrémités et soumis à des vibrations pendant 30 min selon ses trois axes orthogonaux, à savoir l'axe vertical, l'axe latéral et l'axe longitudinal, à la fréquence de résonance correspondant à l'amplitude de vibration maximale pour chaque axe. On détermine ces fréquences en appliquant une accélération de 1,5 g et en balayant

en 10 minutes une plage de fréquences sinusoïdales comprises entre 10 et 500 Hz. Si aucune fréquence de résonance n'est mise en évidence dans la plage ci-dessus, l'essai est effectué à une fréquence de 40 Hz. À la suite de cet essai, le spécimen d'essai ne doit présenter aucun signe de détérioration extérieure susceptible de compromettre son bon fonctionnement. Une fois l'essai achevé, l'échantillon doit satisfaire aux prescriptions de l'essai d'étanchéité (par. 6.2.6.2.2) et l'essai de résistance hydrostatique (par. 6.2.6.2.1).

6.2.6.2.9 Essai de fissuration par corrosion sous contrainte

Cet essai est applicable uniquement aux vannes d'arrêt et aux clapets antiretour contenant des pièces en alliages de cuivre qui sont exposées à l'environnement extérieur. Il est possible de mener cet essai en absence d'information sur la présence d'alliages de cuivre.

Dans le cas des vannes et clapets contenant des pièces en alliages de cuivre (laiton, par exemple), un seul échantillon est soumis à l'essai. Le spécimen d'essai est démonté et toutes ses pièces en alliages de cuivre sont dégraissées ; il est ensuite remonté avant d'être placé dans une chambre en verre fermée par un couvercle en verre et exposé en continu pendant au moins 10 jours à un brouillard d'ammoniac

On verse une solution aqueuse d'ammoniac de densité relative de 0,94 au fond de la chambre en verre ; la quantité de solution doit être supérieure ou égale à 2 % du volume de la chambre. L'échantillon est placé à 35 ± 5 mm au-dessus de la solution aqueuse d'ammoniac, sur un plateau en matériau inerte. Le brouillard d'ammoniac est maintenu à la pression atmosphérique, à une température de 35 ± 5 °C. Les pièces en alliage de cuivre ne doivent présenter ni fissures ni délamination à la fin de l'essai.

7. Véhicules équipés d'un système de stockage d'hydrogène liquéfié

7.1 Prescriptions facultatives applicables aux véhicules équipés d'un système de stockage d'hydrogène liquéfié

Comme il est dit aux paragraphes 23 et 118 du préambule, les Parties contractantes peuvent adopter le RTM ONU avec ou sans les prescriptions applicables aux véhicules à système de stockage d'hydrogène liquéfié énoncées au paragraphe 7.

La présente section est subdivisée comme suit :

Paragraphe 7.2 : Prescriptions de qualification de la conception du système de stockage d'hydrogène liquéfié

Paragraphe 7.3 : Intégrité du système d'alimentation en carburant du système de stockage d'hydrogène liquéfié

Paragraphe 7.4 : Procédures d'essai de qualification de la conception du système de stockage d'hydrogène liquéfié

Paragraphe 7.5 : Procédures d'essai de vérification de l'intégrité du système de stockage d'hydrogène liquéfié

7.2 Prescriptions de qualification de la conception du système de stockage d'hydrogène liquéfié

On trouvera ci-après les prescriptions visant à garantir l'intégrité du système de stockage d'hydrogène liquéfié.

Le système de stockage d'hydrogène doit satisfaire aux prescriptions des essais fonctionnels de qualification énoncées ici. Tous les systèmes de stockage d'hydrogène liquéfié destinés aux véhicules routiers doivent être conformes à ces prescriptions.

Le fabricant doit indiquer la pression de service maximale admissible (PSMA) de l'enveloppe interne.

Le tableau 14 récapitule les essais à exécuter.

Les critères indiqués s'appliquent à la qualification des systèmes de stockage destinés à la production de véhicules neufs, et non à la requalification d'un système en vue de son utilisation au-delà de sa durée de service prévue ou à la requalification d'un système ayant pu être gravement endommagé.

Tableau 14

Synthèse des prescriptions applicables aux essais de qualification

Paragraphe 7.2.1 Essais de vérification des caractéristiques de référence

7.2.1.1 Essai de pression d'épreuve

7.2.1.2 Essai de pression d'éclatement initiale de référence (enveloppe interne)

7.2.1.3 Essai de résistance aux cycles de pression (nombre minimal de cycles)

Paragraphe 7.2.2 Essais de vérification des caractéristiques attendues en utilisation sur route

7.2.2.1 Essai du système de gestion des évaporats

7.2.2.2 Essai de fuite

7.2.2.3 Essai de perte de vide

Paragraphe 7.2.3 Essai de vérification du comportement au feu : brasier (conditions justifiant le retrait du service)

Paragraphe 7.2.4 Essais de vérification des composants

7.2.1 Essais de vérification des caractéristiques de référence

7.2.1.1 Essai de pression d'épreuve

On soumet un système de stockage d'hydrogène à une pression d'essai $p_{\text{test}} \geq 1,3 \times (\text{PSMA} \pm 0,1 \text{ MPa})$, conformément à la procédure décrite au paragraphe 7.4.1.1. Le réservoir ne doit présenter aucune déformation visible, perte de pression ou fuite détectable.

7.2.1.2 Essai de pression d'éclatement initiale de référence

L'essai se déroule conformément à la procédure décrite au paragraphe 7.4.1.2, sur un spécimen d'enveloppe interne dépourvue de sa coque extérieure et non isolée.

La pression d'éclatement doit être au moins égale à la pression d'éclatement utilisée pour les calculs mécaniques. Pour les réservoirs en acier, cette pression est égale à :

a) La pression de service maximale admissible (PSMA) (en MPa) plus 0,1 MPa multipliée par 3,25 ;

ou

b) La pression de service maximale admissible (PSMA) (en MPa) plus 0,1 MPa multipliée par 1,5 et par R_m/R_p , où R_m est la résistance minimale à la traction du matériau du réservoir et R_p la limite minimale d'élasticité, qui est égale à 1,0 pour les aciers austénitiques et 0,2 pour les autres aciers.

7.2.1.3 Essai de résistance aux cycles de pression (nombre minimal de cycles)

Dans le cas des réservoirs ou des enveloppes à vide isolant en métal, le fabricant doit démontrer par calcul que le réservoir est conçu conformément à la réglementation régionale ou aux normes régionales en vigueur (par exemple, le document ASME Boiler and Pressure Vessel Code pour les États-Unis, les normes EN 1251-1 et EN 1251-2 pour l'Europe et un règlement applicable à la conception des réservoirs sous pression métalliques pour tous les autres

pays), ou concevoir et exécuter des essais appropriés (y compris l'essai décrit au paragraphe 7.4.1.3) prouvant que le niveau de sécurité est équivalent à celui d'une conception fondée sur une norme reconnue et démontrée par calcul.

Dans le cas des réservoirs ou des enveloppes à vide isolant non métalliques, outre l'essai présenté au paragraphe 7.4.1.3, il incombe au fabricant de concevoir des essais adaptés afin de démontrer que le niveau de sécurité est identique à celui d'un réservoir métallique.

7.2.2 Essais de vérification des caractéristiques attendues en utilisation sur route

7.2.2.1 Essai du système de gestion des évaporats

L'essai du système de gestion des évaporats est réalisé sur un système de stockage d'hydrogène liquéfié doté de tous les organes et dispositifs présentés au paragraphe 1 b) de la section G (fig. 36 de la partie I). Son exécution sur un système rempli d'hydrogène liquéfié, conformément à la procédure d'essai décrite au paragraphe 7.4.2.1, doit permettre de démontrer que le système de gestion des évaporats maintient la pression de l'enveloppe interne en dessous de la pression de service maximale admissible.

7.2.2.2 Essai de fuite d'hydrogène

Après l'essai du système de gestion des évaporats (voir le paragraphe 7.2.2.1), on maintient le système à la pression d'évaporation et on mesure le débit de fuite total conformément à la procédure d'essai décrite au paragraphe 7.4.2.2. Le débit de fuite maximal du système de stockage d'hydrogène est égal à $R \times 150$ Nml/min, avec

$R = (V_{\text{width}} + 1) \times (V_{\text{height}} + 0,5) \times (V_{\text{length}} + 1)/30,4$, où V_{width} , V_{height} et V_{length} sont respectivement la largeur, la hauteur et la longueur du véhicule, exprimées en mètres.

7.2.2.3 Essai de perte de vide

L'essai de perte de vide est réalisé sur un système de stockage d'hydrogène liquéfié doté de tous les organes et dispositifs décrits au paragraphe 1 b) de la section G (figure 36 de la partie I). Son exécution sur un système rempli d'hydrogène liquéfié, conformément à la procédure d'essai décrite au paragraphe 7.4.2.3, doit permettre de démontrer que les dispositifs de décompression primaire et les dispositifs de décompression secondaires limitent respectivement la pression aux valeurs indiquées au paragraphe 7.4.2.3 en cas de perte de vide.

7.2.3 Essai de vérification du comportement au feu : brasier (conditions justifiant le retrait du service)

Un système au moins doit être utilisé pour démontrer le bon fonctionnement des dispositifs de décompression et l'absence de rupture dans les conditions justifiant le retrait du service décrites ci-dessous. La procédure d'essai est décrite au paragraphe 7.4.3.

On remplit à moitié un système de stockage d'hydrogène liquéfié, puis on l'expose au feu conformément à la procédure d'essai décrite au paragraphe 7.4.3. Le ou les dispositifs de décompression doivent évacuer de façon contrôlée le gaz contenu dans le système, sans éclatement de celui-ci.

Dans le cas des réservoirs en acier, l'essai est considéré comme réussi lorsque les prescriptions relatives aux pressions de déclenchement des dispositifs de décompression sont satisfaites (voir le paragraphe 7.4.3). Pour les réservoirs fabriqués dans d'autres matériaux, il convient de démontrer que le niveau de sécurité est équivalent.

7.2.4 Essais de vérification des composants

Il n'est pas nécessaire de soumettre l'ensemble du système de stockage à une requalification (par. 7.2) si les dispositifs d'arrêt et de décompression du réservoir (à savoir les éléments présentés à la figure 36 de la partie I, à l'exclusion du réservoir) sont remplacés par des dispositifs équivalents dont les fonctions, les raccords et les dimensions sont comparables et qui ont subi avec succès les mêmes essais de qualification que les composants d'origine (par. 7.2.4.1 et 7.2.4.2).

7.2.4.1 Prescriptions de qualification des dispositifs de décompression

Les essais de qualification de la conception doivent être effectués sur des dispositifs de décompression représentatifs de la production normale. Ces dispositifs doivent subir avec succès les essais de qualification ci-après :

- a) Essai de résistance à la pression (selon la procédure décrite au paragraphe 7.4.4.1) ;
- b) Essai de fuite externe (selon la procédure décrite au paragraphe 7.4.4.2) ;
- c) Essai de fonctionnement (selon la procédure décrite au paragraphe 7.4.4.4) ;
- d) Essai de résistance à la corrosion (selon la procédure décrite au paragraphe 7.4.4.4) ;
- e) Essai de cycles de température (selon la procédure décrite au paragraphe 7.4.4.8).

7.2.4.2 Prescriptions de qualification des vannes d'arrêt

Les essais de qualification de la conception doivent être réalisés sur des vannes d'arrêt (« dispositifs d'arrêt » sur la figure 36 de la partie I) représentatives de la production normale. Ces vannes doivent passer avec succès les essais de qualification ci-après :

- a) Essai de résistance à la pression (selon la procédure décrite au paragraphe 7.4.4.1) ;
- b) Essai de fuite externe (selon la procédure décrite au paragraphe 7.4.4.2) ;
- c) Essai d'endurance (selon la procédure décrite au paragraphe 7.4.4.3) ;
- d) Essai de résistance à la corrosion (selon la procédure décrite au paragraphe 7.4.4.5) ;
- e) Essai de résistance à la chaleur sèche (selon la procédure décrite au paragraphe 7.4.4.6) ;
- f) Essai de résistance à l'ozone (selon la procédure décrite au paragraphe 7.4.4.7) ;
- g) Essai de cycles de température (selon la procédure décrite au paragraphe 7.4.4.8) ;
- h) Essai de cycles de pression des flexibles (selon la procédure décrite au paragraphe 7.4.4.9).

7.2.5 Étiquetage

Une étiquette doit être fixée de façon permanente sur chaque réservoir et contenir au moins les renseignements suivants : nom du fabricant, numéro de série, date de fabrication, pression de service maximale admissible et type de carburant. Les étiquettes apposées sur le réservoir conformément au présent paragraphe doivent rester en place. Les Parties contractantes peuvent définir des prescriptions supplémentaires en matière d'étiquetage.

7.3 Intégrité du système d'alimentation en carburant du système de stockage d'hydrogène liquéfié

On trouvera ci-après les prescriptions relatives à l'intégrité du système d'alimentation en hydrogène, qui comprend le système de stockage d'hydrogène liquéfié, les tuyauteries, les raccords et les composants contenant de l'hydrogène. Ces prescriptions s'ajoutent à celles du paragraphe 5.2, qui s'appliquent toutes aux véhicules équipés d'un système de stockage d'hydrogène liquéfié, sauf celles du paragraphe 5.2.1.1. L'étiquette apposée sur l'embout de remplissage doit indiquer que l'hydrogène liquéfié est le type de carburant à utiliser. Les procédures d'essai sont décrites au paragraphe 7.5.

7.3.1 Les matériaux inflammables du véhicule doivent être protégés des gaz de l'air liquéfiés par condensation sur des composants du système d'alimentation.

7.3.2 L'isolation des composants doit empêcher la liquéfaction des gaz de l'air au contact des surfaces extérieures du système, à moins qu'un dispositif de collecte et de vaporisation des gaz de l'air liquéfiés ne soit utilisé. Les matériaux constitutifs des composants situés à proximité doivent être compatibles avec une atmosphère enrichie en oxygène.

7.4 Procédures d'essai de qualification de la conception du système de stockage d'hydrogène liquéfié

7.4.1 Essais de vérification des caractéristiques de référence

7.4.1.1 Essai de pression d'épreuve

L'enveloppe interne et la tuyauterie située entre cette dernière et la coque extérieure doivent subir avec succès un essai de pression interne à température ambiante, conformément aux prescriptions suivantes.

La pression d'essai p_{test} est définie par le fabricant et elle doit satisfaire au critère suivant :

$$p_{\text{test}} \geq 1,3 \times (\text{PSMA} \pm 0,1 \text{ MPa})$$

- a) Dans le cas d'un réservoir métallique, soit p_{test} est égale ou supérieure à la pression maximale de l'enveloppe interne en conditions dégradées (comme indiqué au paragraphe 7.4.2.3), soit le fabricant doit démontrer par calcul que la limite d'élasticité de l'enveloppe interne n'est pas atteinte à cette pression en conditions dégradées ;
- b) Dans le cas d'un réservoir non métallique, p_{test} doit être égale ou supérieure à la pression maximale de l'enveloppe interne en conditions dégradées (comme indiqué au paragraphe 7.4.2.3).

La procédure d'essai est la suivante :

- a) L'essai s'applique à l'enveloppe interne et à la tuyauterie entre celle-ci et l'enveloppe à vide isolant avant le montage de cette dernière ;
- b) L'essai est effectué hydrauliquement avec de l'eau ou un mélange de glycol et d'eau, ou bien pneumatiquement avec du gaz. On augmente la pression de manière constante jusqu'à ce qu'elle atteigne la pression d'essai p_{test} , et on maintient cette pression pendant au moins 10 min ;
- c) L'essai se déroule à la température ambiante. Si la mise sous pression est pneumatique (avec du gaz), elle doit être effectuée de façon que le réservoir reste à température ambiante ou à une température proche de celle-ci.

L'essai est considéré comme réussi si le réservoir ne présente aucun signe de déformation permanente, de perte de pression ou de fuite pendant les 10 premières minutes de maintien de la pression d'épreuve.

7.4.1.2 Essai de pression d'éclatement initiale de référence

La procédure d'essai est la suivante :

- a) L'essai s'applique à l'enveloppe interne et se déroule à la température ambiante ;
- b) L'essai est effectué hydrauliquement avec de l'eau ou un mélange de glycol et d'eau ;
- c) On augmente la pression de manière constante (vitesse de montée en pression inférieure ou égale à 0,5 MPa/min) jusqu'à ce que le réservoir éclate ou se mette à fuir ;
- d) Une fois la pression de service maximale admissible (PSMA) atteinte, on maintient cette pression pendant au moins 10 minutes afin de vérifier si le réservoir subit ou non une déformation ;
- e) La pression est enregistrée ou consignée par écrit du début à la fin de l'essai.

Dans le cas des enveloppes internes en acier, on considère que l'essai est réussi si l'un au moins des deux critères indiqués au paragraphe 7.2.1.2 est respecté. Dans le cas des enveloppes internes en alliage d'aluminium ou fabriquées dans un autre matériau, il convient de définir un critère de réussite qui garantit au minimum un niveau de sécurité identique à celui des enveloppes internes en acier.

7.4.1.3 Essai de résistance aux cycles de pression (nombre minimal de cycles)

On soumet les réservoirs et/ou les enveloppes à vide isolant à un nombre de cycles de pression au moins trois fois supérieur au nombre de cycles complets possibles (de la pression de fonctionnement la plus basse à la plus élevée) afin de vérifier les caractéristiques attendues en utilisation sur route. Le nombre de cycles de pression est déterminé par le fabricant en fonction de la plage de pression de fonctionnement, de la taille du réservoir et du nombre maximal de ravitaillements ainsi que du nombre maximal de cycles de pression dans des conditions extrêmes d'utilisation et de stockage. On soumet le spécimen d'essai à des cycles de pression entre la pression atmosphérique et la PSMA, aux températures de l'azote liquide, par exemple en remplissant le réservoir d'azote liquide jusqu'à un niveau donné, puis en le mettant successivement sous pression et hors pression avec de l'azote ou de l'hélium gazeux (prérefroidi).

7.4.2 Essais de vérification des caractéristiques attendues en utilisation sur route

7.4.2.1 Essai du système de gestion des évaporats

La procédure d'essai est la suivante :

- a) On effectue un conditionnement préalable en remplissant le réservoir d'hydrogène liquéfié jusqu'au niveau de remplissage maximal spécifié. On soutire ensuite l'hydrogène jusqu'à ce que le réservoir soit seulement à moitié plein et on laisse le système refroidir complètement pendant au moins 24 h et au plus 48 h ;
- b) On remplit le réservoir jusqu'au niveau de remplissage maximal spécifié ;
- c) On augmente la pression jusqu'à ce que la pression d'évaporation soit atteinte ;
- d) On prolonge l'essai pendant au moins 48 h après le début de l'évaporation et on ne l'arrête qu'une fois la pression stabilisée. La pression est considérée comme stable lorsque sa valeur moyenne reste constante pendant 2 h.

La pression de l'enveloppe interne est enregistrée ou consignée par écrit du début à la fin de l'essai. On considère que l'essai est réussi si les conditions suivantes sont remplies :

- a) La pression se stabilise et reste inférieure à la PSMA durant tout l'essai ;
- b) Les dispositifs de décompression ne se déclenchent pas pendant l'essai.

7.4.2.2 Essai d'étanchéité

L'essai de fuite d'hydrogène est réalisé conformément à la procédure décrite au paragraphe 7.4.4.2.

7.4.2.3 Essai de perte de vide

La première partie de cet essai se déroule comme suit :

- a) L'essai est effectué sur un réservoir complètement refroidi (conformément à la procédure décrite au paragraphe 7.4.2.1) ;
- b) On remplit le réservoir avec de l'hydrogène liquéfié jusqu'au niveau de remplissage maximal spécifié ;
- c) On injecte de l'air à débit constant dans l'enveloppe à vide isolant jusqu'à ce que la pression atmosphérique soit atteinte ;
- d) L'essai s'arrête dès que le dispositif de décompression primaire ne se déclenche plus.

Les pressions de l'enveloppe interne et de l'enveloppe à vide isolant sont enregistrées ou consignées par écrit du début à la fin de l'essai. La pression de déclenchement du dispositif de décompression primaire est enregistrée ou consignée par écrit. La première partie de l'essai est considérée comme réussie s'il est satisfait aux conditions suivantes :

- a) Le dispositif de décompression primaire se déclenche à une pression inférieure ou égale à la PSMA et limite la pression à une valeur inférieure ou égale à 110 % de la PSMA ;
- b) Le dispositif de décompression primaire ne se déclenche pas à une pression supérieure à la PSMA ;
- c) Le dispositif de décompression secondaire ne se déclenche pas pendant l'essai.

Une fois la première partie de l'essai exécutée avec succès, on répète l'essai après avoir régénéré le vide et refroidi le réservoir comme expliqué précédemment :

- a) Le niveau de vide doit être conforme à la valeur indiquée par le fabricant. Le vide est maintenu durant 24 h au moins. La pompe à vide peut rester raccordée jusqu'au démarrage de la seconde partie de l'essai de perte de vide ;
- b) La seconde partie de l'essai de perte de vide se déroule avec un réservoir complètement refroidi (conformément à la procédure décrite au paragraphe 7.4.2.1) ;
- c) On remplit le réservoir jusqu'au niveau de remplissage maximal spécifié ;
- d) On obture la tuyauterie en aval du dispositif de décompression primaire et on injecte de l'air à débit constant dans l'enveloppe à vide isolant jusqu'à ce que la pression atmosphérique soit atteinte ;
- e) L'essai s'arrête dès que le dispositif de décompression secondaire ne se déclenche plus.

Les pressions de l'enveloppe interne et de l'enveloppe à vide isolant sont enregistrées ou consignées par écrit du début à la fin de l'essai. Dans le cas

d'un réservoir en acier, la seconde partie de l'essai est considérée comme réussie si le dispositif de décompression secondaire ne se déclenche pas en dessous de 110 % de la pression de consigne du dispositif de décompression primaire et limite la pression dans le réservoir à une valeur inférieure ou égale à 136 % de la PSMA s'il s'agit d'une soupape de surpression ou à 150 % de la PSMA s'il s'agit d'un disque de rupture. Pour les réservoirs fabriqués dans d'autres matériaux, il convient de démontrer que le niveau de sécurité est équivalent.

7.4.3 Essai de vérification du comportement au feu (conditions justifiant le retrait du service)

Le système de stockage d'hydrogène liquéfié soumis à l'essai doit être représentatif du type à homologuer, aussi bien en ce qui concerne sa conception que sa fabrication. Il doit s'agir d'un produit fini, équipé de tous ses accessoires.

La première partie de cet essai se déroule comme suit :

- a) L'épreuve du brasier est effectuée sur un réservoir complètement refroidi (conformément aux dispositions du paragraphe 7.4.2.1) ;
- b) Le réservoir doit avoir contenu pendant les 24 h précédentes un volume d'hydrogène liquéfié au moins égal à la moitié de la capacité en eau de l'enveloppe interne ;
- c) Le réservoir doit contenir une quantité d'hydrogène liquéfié égale, en masse, à la moitié de la capacité maximale de l'enveloppe interne ;
- d) Le réservoir est placé à 0,1 m au-dessus d'un feu. La longueur et la largeur de la zone de feu doivent dépasser celles du réservoir de 0,1 m. La température du feu doit être supérieure ou égale à 590 °C et il doit brûler pendant toute la durée de l'essai ;
- e) Au début de l'essai, la pression dans le réservoir doit être comprise entre 0 MPa et 0,01 MPa au point d'ébullition de l'hydrogène dans l'enveloppe interne ;
- f) On poursuit l'essai jusqu'à ce que la pression dans le réservoir retombe à une pression inférieure ou égale à la valeur initiale, ou bien, lorsque le dispositif de décompression primaire est du type refermable, jusqu'à ce que le dispositif en question se déclenche une seconde fois ;
- g) Les conditions d'essai et la pression maximale atteinte à l'intérieur du réservoir pendant l'essai sont consignées dans un procès-verbal signé par le fabricant et les services techniques.

L'essai est considéré comme réussi si les conditions suivantes sont remplies :

- a) Le dispositif de décompression secondaire ne se déclenche pas en dessous de 110 % de la pression de consigne du dispositif de décompression primaire ;
- b) Le réservoir n'éclate pas et la pression dans l'enveloppe interne ne sort pas de la plage admissible.

La plage de pression admissible pour les réservoirs en acier est définie comme suit :

- a) Si le dispositif de décompression secondaire est une soupape de surpression, la pression à l'intérieur du réservoir ne doit pas dépasser 136 % de la PSMA de l'enveloppe interne ;
- b) Si le dispositif de décompression secondaire est un disque de rupture situé à l'extérieur de la zone sous vide, la pression à l'intérieur du réservoir ne doit pas dépasser 150 % de la PSMA de l'enveloppe interne ;

- c) Si le dispositif de décompression secondaire est un disque de rupture situé à l'intérieur de la zone sous vide, la pression à l'intérieur du réservoir ne doit pas dépasser 150 % de la pression de service maximale admissible de l'enveloppe interne plus 0,1 MPa (PSMA \pm 0,1 MPa).

Pour les réservoirs fabriqués dans d'autres matériaux, il convient de démontrer que le niveau de sécurité est équivalent.

7.4.4 Essais de vérification des composants

Les essais doivent être effectués avec de l'hydrogène gazeux conforme aux normes ISO 14687:2019/SAE J2719_202003. Ils doivent être exécutés à température ambiante, c'est-à-dire 20 (\pm 5) °C, sauf indication contraire. Les essais de qualification des dispositifs de décompression thermocommandés sont énumérés ci-après :

7.4.4.1 Essai de résistance à la pression

Les composants contenant de l'hydrogène doivent supporter une pression égale à 150 % de la PSMA sans présenter aucune fuite ou déformation visible, les orifices de sortie étant obturés. Les composants doivent ensuite supporter une pression égale à 300 % de la PSMA sans présenter de signes visibles de rupture ou de fissure.

Le système de mise sous pression doit être équipé d'une vanne d'arrêt à sécurité positive et d'un manomètre dont la plage de pression est comprise entre 150 et 200 % de la pression d'essai et dont la précision est égale à 1 % de la pleine échelle.

Pour les composants qui doivent être soumis à un essai d'étanchéité, cet essai doit être effectué avant l'essai de pression.

7.4.4.2 Essai de fuite externe

Les composants soumis aux essais décrits au paragraphe 7.4.4.3 doivent supporter une pression pneumatique comprise entre 0 et la PSMA sans présenter de fuite au niveau des joints de la tige, du corps ou d'autres joints et sans présenter de signes de porosité (défaut de fonderie).

L'essai doit être effectué sur le même spécimen, dans les conditions suivantes :

- a) À température ambiante ;
- b) À la température de fonctionnement minimale ou à la température de l'azote liquide après une période de conditionnement suffisante pour stabiliser thermiquement le spécimen d'essai ;
- c) À la température de fonctionnement maximale après une période de conditionnement suffisante pour stabiliser thermiquement le spécimen d'essai.

Pendant l'essai, le spécimen doit être raccordé à une source de gaz sous pression. La conduite d'alimentation doit être équipée d'une vanne d'arrêt à sécurité positive et d'un manomètre dont la plage de pression est comprise entre 150 et 200 % de la pression d'essai et dont la précision est égale à 1 % de la pleine échelle. Le manomètre doit être placé entre la vanne d'arrêt et le spécimen d'essai.

On recherche les fuites pendant toute la durée de l'essai d'étanchéité à l'aide d'un agent tensioactif. Si des bulles apparaissent, le débit de fuite correspondant ne doit pas être supérieur à 216 Nml/h.

7.4.4.3 Essai d'endurance

- 7.4.4.3.1 Les composants doivent satisfaire aux prescriptions des essais d'étanchéité des paragraphes 7.4.4.2 et 7.4.4.9, après avoir subi 20 000 cycles de fonctionnement.

- 7.4.4.3.2 Les essais de fuite externe et d'étanchéité du siège décrits aux paragraphes 7.4.4.2 et 7.4.4.9 doivent être effectués juste après l'essai d'endurance.
- 7.4.4.3.3 La vanne d'arrêt doit être raccordée de manière sécurisée à une source d'air ou d'azote sec sous pression et subir 20 000 cycles de fonctionnement. Par cycle de fonctionnement, on entend une ouverture et une fermeture de la vanne, la durée du cycle étant supérieure ou égale à 10 ± 2 s.
- 7.4.4.3.4 Le composant doit être soumis à un nombre de cycles égal à 96 % du nombre de cycles prévu, à sa PSMA et à température ambiante. Pendant la phase de fermeture, la pression en aval du montage d'essai doit redescendre jusqu'à 50 % de la PSMA du composant.
- 7.4.4.3.5 Après une période de conditionnement suffisante pour le stabiliser thermiquement, le composant doit être soumis à un nombre de cycles égal à 2 % du nombre total de cycles, à sa PSMA et à la température maximale du matériau (-40 à +85 °C). Une fois les cycles de fonctionnement à haute température terminés, le composant doit satisfaire aux dispositions des paragraphes 7.4.4.2 et 7.4.4.9 à la température maximale du matériau (-40 à +85 °C).
- 7.4.4.3.6 Après une période de conditionnement suffisante pour le stabiliser thermiquement, le composant doit être soumis à un nombre de cycles égal à 2 % du nombre total de cycles, à sa PSMA et à la température minimale du matériau (-40 à +85 °C), qui doit être supérieure ou égale à la température de l'azote liquide. Une fois les cycles de fonctionnement à basse température terminés, le composant doit satisfaire aux dispositions des paragraphes 7.4.4.2 et 7.4.4.9 à la température minimale du matériau (-40 à +85 °C).
- 7.4.4.4 Essai de fonctionnement
- L'essai de fonctionnement doit être effectué conformément à la norme EN 13648-1 ou 13648-2. Les prescriptions propres à ces deux normes sont applicables.
- 7.4.4.5 Essai de résistance à la corrosion
- Les composants métalliques contenant de l'hydrogène doivent satisfaire aux essais d'étanchéité décrits aux paragraphes 7.4.4.2 et 7.4.4.9 après avoir été soumis pendant 144 h à un brouillard salin conformément à la norme ISO 9227, tous les raccords étant obturés.
- Les composants en cuivre ou en laiton contenant de l'hydrogène doivent satisfaire aux essais d'étanchéité visés aux paragraphes 7.4.4.2 et 7.4.4.9 après avoir été exposés pendant 24 h à une atmosphère ammoniacale, conformément à la norme ISO 6957, tous les raccords étant obturés.
- 7.4.4.6 Essai de résistance à la chaleur sèche
- L'essai doit être effectué conformément à la norme ISO 188. L'échantillon doit être exposé pendant 168 h à l'air à une température égale à sa température de fonctionnement maximale. Sa résistance à la traction ne doit pas varier de plus de 25 %. Son allongement à la rupture ne doit pas :
- augmenter de plus de 10 %,
- ou diminuer de plus de 30 %.
- 7.4.4.7 Essai de résistance à l'ozone
- L'essai doit être effectué conformément à la norme ISO 1431-1. L'échantillon doit subir une elongation sous contrainte de 20 % et être exposé à de l'air à +40 °C ayant une teneur en ozone de 50 parties par centaine de millions pendant 120 h.
- L'échantillon ne doit pas présenter de fissures.

- 7.4.4.8 Essai de cycles de température
- Les composants non métalliques contenant de l'hydrogène doivent satisfaire aux essais d'étanchéité visés aux paragraphes 7.4.4.2 et 7.4.4.9 après avoir été soumis pendant 96 h à un essai de cycles de température à leur PSMA ; chaque cycle dure 120 min, la température variant entre la température de fonctionnement minimale et la température de fonctionnement maximale.
- 7.4.4.9 Essai de cycles de pression des flexibles
- Les flexibles d'alimentation en combustible doivent satisfaire aux essais d'étanchéité applicables visés au paragraphe 7.4.4.2 après avoir été soumis à 6 000 cycles de pression.
- La pression d'essai doit passer de la pression atmosphérique à la PSMA du réservoir en moins de 5 s et, après un délai supérieur ou égal à 5 s, retomber à la pression atmosphérique en moins de 5 s.
- L'essai de fuite externe, visé au paragraphe 7.4.4.2, doit être effectué immédiatement après l'essai d'endurance.
- 7.5 Procédures d'essai de vérification de l'intégrité du système de stockage d'hydrogène liquéfié
- 7.5.1 Essai d'étanchéité du système de stockage d'hydrogène liquéfié après un choc
- Avant de subir l'essai de choc, le système de stockage d'hydrogène liquéfié doit être préparé comme suit :
- a) S'il est nécessaire de mener les essais décrits au paragraphe 6.1.1, il convient d'installer les instruments et dispositifs ci-dessous s'ils ne font pas partie de l'équipement de série du véhicule :
 - i) Un capteur de pression capable de mesurer des valeurs supérieures ou égales à 10 kPa. La limite supérieure de sa plage de mesure à pleine échelle doit être supérieure ou égale à 150 % de la PSMA, et sa précision doit être supérieure ou égale à 1 % de la pleine échelle ;
 - ii) Un capteur de température capable de mesurer les températures cryogéniques attendues avant le choc. Il doit être placé à proximité d'un orifice de sortie, aussi près que possible du réservoir ;
 - iii) Des orifices de remplissage et de vidange permettant de remplir ou de vider le système de stockage de son contenu liquide ou gazeux, avant et après l'essai de choc ;
 - b) Le système de stockage est purgé avec au moins 5 volumes d'azote gazeux ;
 - c) Le système de stockage est rempli d'azote à un niveau équivalent au taux maximal de remplissage de l'hydrogène en poids ;
 - d) Une fois le système rempli, on obture l'évent et on laisse le réservoir se stabiliser ;
 - e) On vérifie que le système de stockage est bien étanche.
- Lorsque le capteur de température et le capteur de pression indiquent respectivement que le système s'est refroidi et que sa pression s'est stabilisée, le véhicule est soumis à l'essai de choc conformément à la réglementation en vigueur dans le pays ou la région concernés. Le système ne doit présenter aucune fuite visible d'azote gazeux ou liquide froid pendant au moins 1 h après le choc. Il convient également de vérifier que les détendeurs ou les dispositifs de décompression fonctionnent toujours correctement afin de garantir que le système de stockage d'hydrogène liquéfié est protégé contre l'éclatement après le choc. Si le choc n'a pas provoqué une perte de vide, on peut ajouter de

l'azote gazeux dans le système (par l'orifice de remplissage ou de vidange) jusqu'à ce que les détendeurs et/ou les dispositifs de décompression se déclenchent. Si les détendeurs ou dispositifs de décompression sont du type refermable, il faut démontrer qu'ils peuvent effectuer au moins 2 cycles complets d'ouverture et de refermeture. Les gaz d'évacuation provenant des détendeurs ou des dispositifs de décompression ne doivent pas être rejetés dans l'habitacle, le compartiment à bagages ou le compartiment à marchandises lors de ces essais après choc.

Après avoir vérifié que les détendeurs ou les dispositifs de décompression fonctionnent toujours correctement, on soumet le système de stockage d'hydrogène liquéfié à un essai d'étanchéité conformément aux dispositions du paragraphe 6.1.1.1 ou 6.1.1.2.

Pour démontrer que les prescriptions ci-dessus sont satisfaites, on peut effectuer l'essai décrit au paragraphe 7.5.1.1 ou les essais de substitution décrits au paragraphe 7.5.1.2 (qui se subdivise en 7.5.1.2.1 et 7.5.1.2.2).

7.5.1.1 Essai d'étanchéité du système de stockage d'hydrogène liquéfié après un choc

L'essai décrit ci-dessous pourrait remplacer à la fois l'essai d'étanchéité prescrit au paragraphe 7.5.1.2.1 et les mesures de concentration de gaz prévues au paragraphe 7.5.1.2.2. Après avoir vérifié que les détendeurs ou les dispositifs de décompression fonctionnent toujours correctement, on vérifie si le système de stockage est étanche en examinant toutes les parties susceptibles de fuir à l'aide d'un détecteur de fuite à hélium étalonné utilisé en mode renifleur. Cet essai peut remplacer l'essai d'étanchéité si les conditions préalables ci-après sont remplies :

- a) Aucune partie susceptible de fuir n'est située en dessous du niveau de l'azote liquide dans le réservoir ;
- b) Toutes les parties susceptibles de fuir sont mises sous pression d'hélium gazeux lorsque le système de stockage est mis sous pression ;
- c) Il est possible de déposer les capots et autres panneaux et composants pour accéder aux parties susceptibles de fuir.

Avant l'essai, le fabricant doit communiquer la liste de toutes les parties du système de stockage susceptibles de fuir, notamment :

- a) Tous les raccords entre tuyaux et entre tuyaux et réservoir ;
- b) Toutes les soudures sur les tuyaux et composants se trouvant en aval du réservoir ;
- c) Les vannes et clapets ;
- d) Les flexibles ;
- e) Les capteurs.

Avant l'essai d'étanchéité, le système de stockage est remis à la pression atmosphérique, puis mis sous pression d'hélium. La pression doit être supérieure ou égale à la pression de fonctionnement, mais largement inférieure à la pression normale de consigne des dispositifs de régulation (de façon à éviter qu'ils ne se déclenchent pendant l'essai). L'essai est jugé satisfaisant si le débit de fuite total (c'est-à-dire le débit correspondant à la totalité des fuites détectées) est inférieur à 216 Nml/h.

7.5.1.2 Essais de substitution aux essais après un choc du système de stockage d'hydrogène liquéfié

Les essais prescrits aux paragraphes 7.5.1.2.1 et 7.5.1.2.2 sont effectués au titre du paragraphe 7.5.1.2.

7.5.1.2.1 Essai de substitution à l'essai d'étanchéité après un choc

Après avoir vérifié que les détendeurs et/ou les dispositifs de décompression fonctionnent toujours correctement, on peut effectuer l'essai ci-dessous afin de mesurer l'importance des fuites après le choc. L'essai de mesure des concentrations prescrit au paragraphe 6.1.1.1 doit être effectué en parallèle, pendant les 60 minutes de la période d'essai, si la concentration en hydrogène n'a pas encore été directement mesurée à la suite de l'essai de choc.

Le réservoir doit être remis à la pression atmosphérique et vidé de son contenu liquide et réchauffé jusqu'à la température ambiante ; à cette fin, on peut par exemple le purger plusieurs fois avec de l'azote chaud ou augmenter la pression de l'enveloppe à vide isolant.

Si la pression de consigne est inférieure à 90 % de la PSMA, le dispositif de décompression doit être désactivé pour empêcher qu'il ne se déclenche et libère du gaz pendant l'essai d'étanchéité.

Le réservoir doit ensuite être purgé avec de l'hélium :

- a) Soit en faisant passer dans le réservoir au moins cinq fois son volume d'hélium ;
- b) Soit en mettant successivement le réservoir sous pression et hors pression au moins cinq fois.

Le système de stockage est ensuite rempli avec de l'hélium, à une pression égale à 80 % de la PSMA du réservoir ou à la pression de déclenchement de la soupape de surpression ± 10 %, si cette seconde valeur est moins élevée, et cette pression est maintenue pendant 60 min. La perte de pression mesurée pendant cette période doit être inférieure ou égale aux valeurs fixées ci-après, en fonction de la contenance en eau du système de stockage :

- a) 2 atm pour les systèmes dont la contenance est inférieure ou égale à 100 l ;
- b) 1 atm pour les systèmes dont la contenance est supérieure à 100 l et inférieure ou égale à 200 l ;
- c) 0,5 atm pour les systèmes dont la contenance est supérieure à 200 l.

7.5.1.2.2 Essai de mesure des concentrations dans les espaces fermés après un choc

Selon le gaz utilisé pour l'essai de choc, les concentrations mesurées pendant l'essai d'étanchéité à l'hydrogène liquéfié (par. 7.5.1.2.1) ou pendant l'essai d'étanchéité à l'hélium (par. 6.1.2) doivent être consignées.

On utilise des capteurs permettant de mesurer soit l'augmentation de la concentration d'hydrogène ou d'hélium, soit la baisse correspondante de la concentration en oxygène (résultant du déplacement d'air induit par les fuites d'hydrogène ou d'hélium).

Les capteurs doivent être étalonnés à partir de références reconnues afin de pouvoir mesurer avec une précision de ± 5 % les valeurs cibles de concentration volumique dans l'air, à savoir 4 % pour l'hydrogène (essai avec de l'hydrogène liquéfié) et 0,8 % pour l'hélium (essai à température ambiante avec de l'hélium) ; la limite supérieure de la plage de mesure à pleine échelle doit être supérieure à ces valeurs d'au moins 25 %. Leur temps de réponse à 90 % à une variation de la concentration correspondant à la pleine échelle doit être inférieur à 10 s.

Leur installation sur un véhicule équipé d'un système de stockage d'hydrogène liquéfié doit satisfaire aux mêmes prescriptions que dans le cas d'un système de stockage d'hydrogène comprimé (par. 6.1.2). Les mesures commencent dès que le véhicule s'est immobilisé dans le cas de l'hydrogène et dès le début de l'essai d'étanchéité dans le cas de l'hélium. Les données relevées par les capteurs sont collectées à des intervalles de temps inférieurs ou égaux à 5 s

pendant 60 min. On peut calculer la moyenne mobile des mesures sur des intervalles de temps inférieurs ou égaux à 5 s pour lisser les données et filtrer les données aberrantes. Les valeurs filtrées fournies par les capteurs doivent être inférieures aux valeurs cibles de concentration volumique dans l'air, à savoir 4 % pour l'hydrogène (essai avec de l'hydrogène liquéfié) et 0,8 % pour l'hélium (essai à température ambiante avec de l'hélium), à tout instant pendant la période de 60 minutes suivant le choc. ».
