



Conseil économique et social

Distr. générale
12 avril 2013
Français
Original: anglais

Commission économique pour l'Europe

Comité des transports intérieurs

Forum mondial de l'harmonisation des Règlements concernant les véhicules

160^e session

Genève, 25-28 juin 2013

Point 14.1 de l'ordre du jour provisoire

**Examen et vote par l'AC.3 concernant des projets
de Règlements techniques mondiaux ou des projets
d'amendements à des Règlements techniques mondiaux existants**

Proposition de Règlement technique mondial sur les véhicules à hydrogène et à pile à combustible

Communication du Groupe de travail de la sécurité passive*

Le texte ci-après a été recommandé par le Groupe de travail de la sécurité passive (GRSP), à sa cinquante-deuxième session, en vue de l'élaboration d'un Règlement technique mondial sur les véhicules à hydrogène et à pile à combustible. Il est fondé sur le document ECE/TRANS/WP.29/GRSP/2012/23 non modifié (ECE/TRANS/WP.29/GRSP/52, par. 18). 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) aux fins d'examen et de mise aux voix, en même temps que le rapport final sur la progression du projet (ECE/TRANS/WP.29/2013/42) et la proposition d'élaboration du projet de RTM publiée sous la cote ECE/TRANS/WP.29/AC.3/17.

* Conformément au programme de travail du Comité des transports intérieurs pour la période 2010-2014 (ECE/TRANS/208, par. 106, et ECE/TRANS/2010/8, activité 02.4), le Forum mondial a pour mission d'élaborer, d'harmoniser et de mettre à jour les Règlements en vue d'améliorer les caractéristiques fonctionnelles des véhicules. Le présent document est soumis dans le cadre de ce mandat.

Projet de Règlement technique mondial sur les véhicules à hydrogène et à pile à combustible

Table des matières

	<i>Page</i>
I. Énoncé de l'argumentation technique justifiant le Règlement.....	4
A. Introduction	4
B. Plan d'action pour l'élaboration du Règlement technique mondial.....	5
C. Description d'un véhicule à hydrogène et à pile à combustible (HFCV) type	6
1. Description du véhicule.....	6
2. Système de ravitaillement en hydrogène.....	8
3. Système de stockage de l'hydrogène	8
4. Système d'alimentation en hydrogène	10
5. Système de pile à combustible	11
6. Moteurs électriques de traction et module de gestion électrique.....	12
D. Argumentation concernant le domaine d'application, les définitions et l'applicabilité des prescriptions	12
1. Argumentation concernant la section 2 (Domaine d'application).....	12
2. Argumentation concernant les paragraphes 3.9 et 3.48 (Définitions de la durée de service et date du retrait de service).....	13
3. Argumentation concernant la section 4 (Applicabilité des prescriptions).....	13
E. Argumentation concernant la section 5 (Prescriptions fonctionnelles).....	14
1. Prescriptions d'essai et considérations de sécurité s'appliquant au système de stockage de l'hydrogène comprimé.....	14
2. Prescriptions s'appliquant au système d'alimentation du véhicule et impératifs de sécurité	34
3. Prescriptions concernant la sécurité électrique et les impératifs de sécurité.....	39
F. Argumentation concernant les procédures d'essai du système de stockage et du système d'alimentation en carburant	41
1. Argumentation concernant les essais d'intégrité du système de stockage et du système d'alimentation en carburant	42
2. Argumentation concernant le paragraphe 6.2: Procédures d'essai pour les systèmes de stockage d'hydrogène comprimé.....	43
G. Argumentation concernant les prescriptions facultatives: Véhicules à système de stockage de l'hydrogène liquéfié	45
1. Informations de base sur les systèmes de stockage de l'hydrogène liquéfié.....	45
2. Argumentation concernant les prescriptions de qualification de la conception du système de stockage de l'hydrogène liquéfié du paragraphe 7.2.....	47
3. Argumentation concernant les prescriptions d'une qualification de conception du système d'alimentation en carburant du véhicule pour l'hydrogène liquéfié (LH2).....	50

4.	Argumentation concernant les procédures d'essai applicables aux systèmes à hydrogène liquéfié.....	51
5.	Argumentation concernant le paragraphe 7.5: Procédure d'essai pour la mesure des concentrations après un choc pour les véhicules à système à hydrogène liquéfié ..	51
H.	Prescriptions nationales concernant la compatibilité des matériaux (y compris les effets de fragilisation par hydrogène) et de conformité de production.....	55
1.	Compatibilité des matériaux et fragilisation par l'hydrogène	55
2.	Prescriptions nationales complémentaires par rapport aux prescriptions du RTM	56
I.	Thèmes à prendre en compte pour la phase suivante d'élaboration du RTM pour les véhicules à hydrogène.....	56
J.	Règlements, directives et normes internationales existants.....	57
1.	Intégrité du système d'alimentation en carburant	57
2.	Système de stockage du carburant	58
3.	Sécurité électrique.....	59
K.	Coûts/avantages du RTM	60
II.	Texte du Règlement	62
1.	Objet.....	62
2.	Domaine d'application	62
3.	Définitions	62
4.	Applicabilité des prescriptions	66
5.	Prescriptions fonctionnelles.....	66
5.1	Système de stockage de l'hydrogène comprimé	66
5.2.	Système d'alimentation en carburant du véhicule.....	74
5.3	Sécurité électrique.....	76
6.	Conditions et procédures d'essai	82
6.1	Essais de conformité en ce qui concerne l'intégrité du système d'alimentation en carburant.....	82
6.2.	Procédures d'essai pour un système de stockage d'hydrogène comprimé	88
6.3	Procédures d'essai touchant à la sécurité électrique (par. 5.3).....	107
7.	Véhicules équipés d'un système de stockage d'hydrogène liquéfié	118
7.1	Prescriptions facultatives s'appliquant aux véhicules équipés d'un système de stockage d'hydrogène liquéfié.....	118
7.2.	Prescriptions de qualification de la conception du système de stockage d'hydrogène liquéfié	119
7.3	Intégrité du système d'alimentation en carburant et du système de stockage d'hydrogène liquéfié	122
7.4.	Procédures d'essai pour la qualification de la conception du système de stockage d'hydrogène liquéfié	123
7.5	Procédures d'essai pour la vérification de l'intégrité des systèmes de stockage de l'hydrogène liquéfié	130

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 une valeur nulle les émissions du 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 2 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 le développement économique 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 de substitution à l'essence et au gazole pour l'alimentation des véhicules. La mise en place de procédures sûres de l'utilisation d'hydrogène en tant que carburant est une condition décisive pour 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 contenu énergétique. La sécurité de l'utilisation d'hydrogène, en particulier sous forme gazeuse comprimée, consiste à prévenir le risque d'accidents catastrophiques faisant intervenir une combinaison des facteurs combustible, air et source d'inflammation, ainsi que pression et risques propres à l'électricité.

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 barrières technologiques à la commercialisation, 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 projet de Règlement technique mondial de l'ONU (RTM) relatif aux véhicules à hydrogène et à pile à combustible a été élaboré au sein du Forum mondial de l'harmonisation concernant les véhicules (WP.29) du Comité des transports intérieurs (CTI) de la CEE. Ce règlement technique mondial répond aux objectifs suivants: établir un RTM s'appliquant aux véhicules fonctionnant à l'hydrogène qui: i) permette d'atteindre ou de dépasser les niveaux de sécurité correspondants s'appliquant aux véhicules classiques fonctionnant à l'essence; et ii) énonce des exigences fonctionnelles et ne fasse pas entrave à l'évaluation technologique future.

B. Plan d'action pour l'élaboration du Règlement technique mondial

5. Étant donné que la technologie des véhicules fonctionnant à l'hydrogène en est toujours à ses débuts, 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 événement 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 (HFCV) et les véhicules classiques, il est nécessaire d'étudier et de déterminer: 1) les principales différences en termes 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.

6. 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 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 soumis par les responsables techniques. Deux sous-groupes ont été constitués pour étudier les aspects du RTM relatifs à la sécurité et à la protection de l'environnement. Le sous-groupe des questions de sécurité (HFCV-SGS) devait rendre compte au Groupe de travail de la sécurité passive (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. Le RTM 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 a été soumis à l'AC.3 et approuvé par ce dernier (ECE/TRANS/WP.29/2007/41).

7. Pour permettre l'élaboration du RTM dans un environnement évolutif en ce qui concerne la technologie de l'hydrogène, le groupe tripartite propose de procéder en 2 phases:

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

Élaboration d'ici à 2010 d'un RTM sur les véhicules à hydrogène fondé sur des essais de choc au niveau des composants, des sous-systèmes et de l'ensemble du véhicule. S'agissant des essais de choc, il est spécifié dans le RTM que chaque Partie contractante applique les procédures d'essai en vigueur dans le pays, mais devra appliquer les valeurs limites adoptées en commun concernant les fuites d'hydrogène en tant que critère des résultats d'essai. 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;

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

Modification du RTM 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 HFCV 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.

8. Le RTM comprendra les éléments principaux suivants:
- a) Prescriptions relatives au niveau de sécurité des 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 de l'hydrogène, aux dispositifs de fermeture à haute pression, aux dispositifs de décompression et aux tuyauteries 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 mesurer le risque et définir des mesures de sécurité appropriées pour les véhicules à hydrogène. Les efforts porteront principalement sur:
 - i) Les valeurs limites autorisées en matière de fuites d'hydrogène en utilisation 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 en vigueur concernant les essais de choc dans chaque juridiction.

C. Description d'un véhicule à hydrogène et à pile à combustible (HFCV) type

1. Description du véhicule

9. Les véhicules à hydrogène peuvent utiliser soit un moteur à combustion interne, soit des piles à combustible comme source d'énergie; en général cependant c'est cette dernière solution qui est appliquée. Les véhicules à hydrogène et à pile à combustible (HFCV) comportent une chaîne de traction alimentée électriquement par une pile à combustible produisant de l'énergie électrique par voie électrochimique à partir d'hydrogène. En général, les véhicules HFCV sont équipés de perfectionnements techniques supplémentaires permettant d'améliorer leur rendement, tels que les systèmes de freinage à

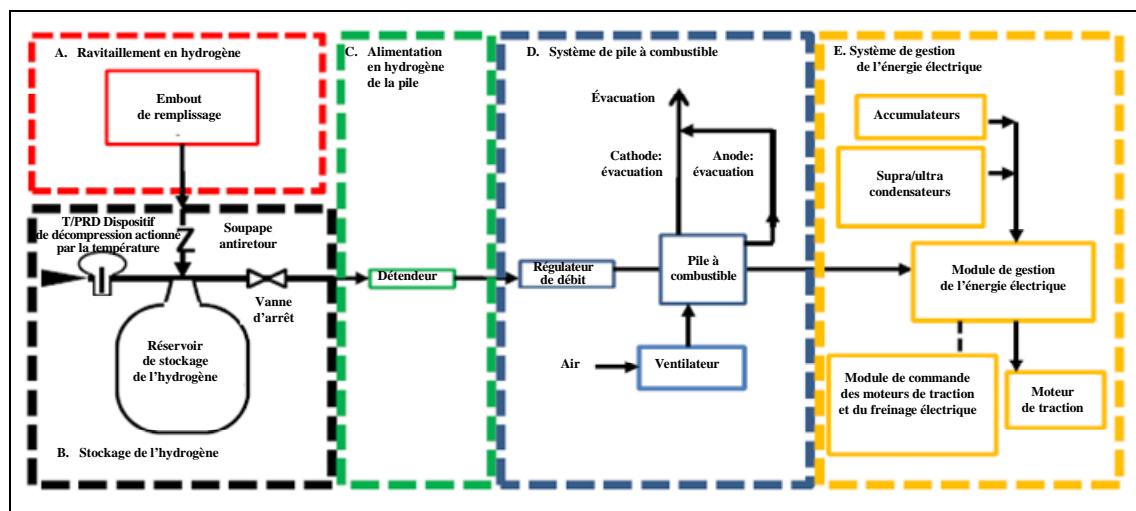
recupération qui récupèrent l'énergie cinétique qui serait perdue lors du freinage et la stockent dans un accumulateur ou dans des ultracondensateurs. Bien que les divers véhicules HFCV diffèrent le plus souvent du point de vue des caractéristiques détaillées des systèmes et des applications pratiques concernant le matériel et le logiciel, ils ont en commun les principaux systèmes énumérés ci-après:

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

10. Un schéma de principe décrivant les interactions fonctionnelles entre les principaux systèmes sur un véhicule à hydrogène à pile à combustible 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 réservoir de stockage de l'hydrogène. L'hydrogène stocké dans le système de stockage de l'hydrogène peut être soit de l'hydrogène gazeux comprimé soit de l'hydrogène liquéfié. Au démarrage du véhicule, l'hydrogène est extrait du système de stockage de l'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 est soumis à une réaction électrochimique de combinaison avec l'oxygène (de l'air) dans le système de pile à combustible, avec génération d'énergie électrique. L'énergie électrique à haute tension ainsi produite est envoyée au système de gestion de l'énergie de propulsion, d'où elle sert à alimenter les moteurs électriques de traction et/ou à charger des accumulateurs ou des ultracondensateurs.

Figure 1

Exemple de schéma de principe des principaux systèmes d'un véhicule HFCV



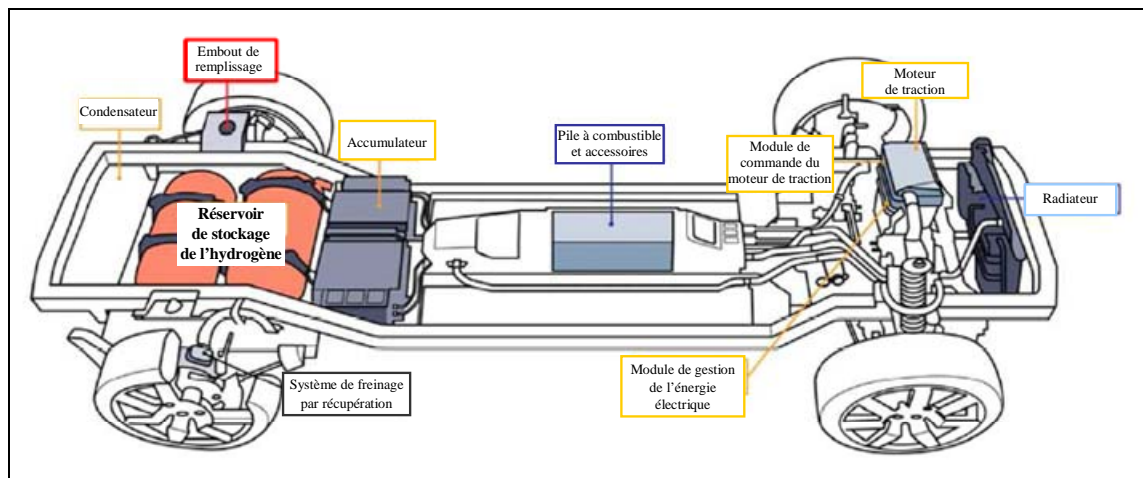
11. La figure 2 illustre la disposition type des composants importants des principaux systèmes d'un véhicule à hydrogène à pile à combustible représentatif. L'embout de ravitaillement est représenté dans un emplacement typique à l'angle arrière gauche du véhicule. Comme dans le cas des réservoirs à essence, les réservoirs de stockage de l'hydrogène, qu'il s'agisse d'hydrogène gazeux comprimé ou liquéfié, sont habituellement montés transversalement à l'arrière du véhicule, mais d'autres possibilités existent telles

que le montage longitudinal dans le tunnel central du véhicule. Les piles à combustible et accessoires sont habituellement placés (comme dans l'illustration) sous l'habitacle ou dans un «compartiment moteur» comme sur les véhicules classiques, ainsi que le module de gestion de puissance, le module de commande des moteurs de traction et les moteurs de traction. Étant donné la dimension et le poids des accumulateurs de traction et des ultracondensateurs, ces composants sont habituellement placés dans le véhicule de manière à réaliser une répartition des masses ne nuisant pas à la stabilité du véhicule.

12. Un schéma typique de la disposition des composants d'un véhicule à hydrogène avec système de stockage d'hydrogène comprimé et pile à combustible est représenté à la figure 2.

Figure 2

Exemple de véhicule à hydrogène à pile à combustible



2. Système de ravitaillement en hydrogène

13. 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.

14. Quel que soit l'état de l'hydrogène, les véhicules sont ravitaillés par l'intermédiaire d'une buse de ravitaillement spéciale sur le distributeur à la station de distribution, qui est raccordée avec l'embout de remplissage sur le véhicule de façon à établir un système de transfert «en circuit fermé» de l'hydrogène vers le véhicule. L'embout de remplissage du véhicule comporte une soupape antiretour (ou un autre dispositif empêchant les fuites d'hydrogène depuis le véhicule lorsque la buse de remplissage est déconnectée).

3. Système de stockage de l'hydrogène

15. Le système de stockage de l'hydrogène est constitué de tous les composants qui forment l'enceinte de confinement à haute pression primaire destinée à retenir l'hydrogène stocké. Les fonctions principales du système de stockage de l'hydrogène sont de recevoir l'hydrogène lors du ravitaillement, de contenir l'hydrogène jusqu'à ce qu'il soit utilisé, puis de le libérer dans les systèmes de piles à combustible pour la production d'électricité 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 de l'hydrogène est décrit dans les sections qui suivent.

16. 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 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 le ravitaillement en gaz cryocomprimé aussi bien qu'en gaz comprimé.

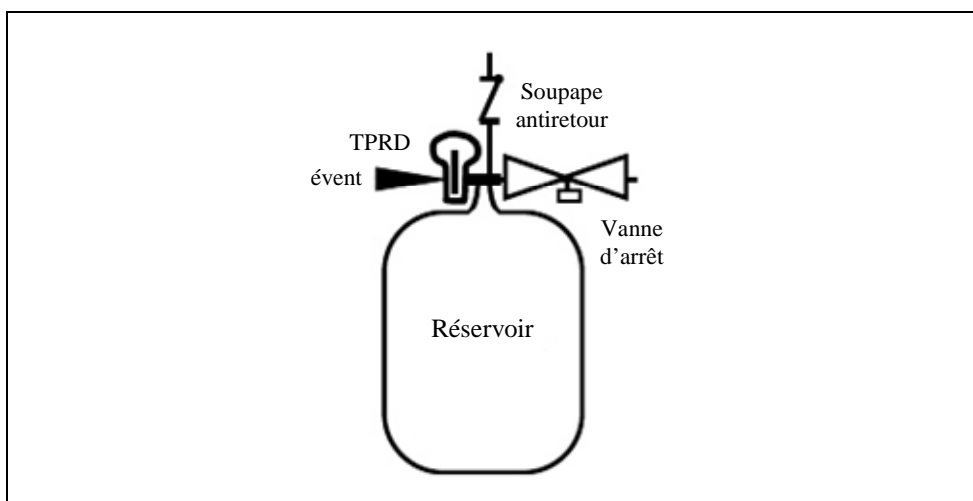
a) *Système de stockage de l'hydrogène comprimé*

17. Les composants d'un système typique de stockage d'hydrogène comprimé sont représentés à la figure 3. Le système inclut le réservoir et tous les autres composants qui forment l'«enceinte primaire à pression» qui empêche l'hydrogène de s'échapper du système. Dans ce cas, les composants ci-après font partie du système de stockage de l'hydrogène comprimé:

- a) Le réservoir;
- b) La soupape antiretour;
- c) La vanne d'arrêt;
- d) Le dispositif de décompression thermocommandé (TPRD).

Figure 3

Système typique de stockage d'hydrogène comprimé



18. Les réservoirs de stockage d'hydrogène servent à emmagasiner le gaz comprimé. Un système de stockage d'hydrogène peut comporter plus d'un réservoir, selon la quantité qui doit être stockée et les contraintes physiques existant sur le véhicule en cause. 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, avec des pressions maximales de remplissage de 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 intérieure des réservoirs peut augmenter de 25 % au-dessus de la pression de service nominale du fait que la compression adiabatique des gaz

cause une élévation de température dans les réservoirs. Lors du refroidissement survenant dans le réservoir après ravitaillement, la pression redescend à une valeur plus basse. Par définition, la pression après stabilisation dans le système sera égale à la pression de service nominale lorsque le réservoir est à 15 °C. Différentes valeurs de pression (supérieures ou inférieures, ou intermédiaires entre les valeurs actuelles) seront éventuellement appliquées à l'avenir au fur et à mesure que la commercialisation de ces techniques évoluera.

19. Les réservoirs sont actuellement construits en matériau composite afin de pouvoir satisfaire aux conditions de confinement de l'hydrogène à haute pression avec un poids acceptable pour une application sur le véhicule. La plupart des réservoirs de stockage d'hydrogène à haute pression utilisés sur les véhicules à pile à combustible se composent de 2 couches: une chemise intérieure qui empêche les fuites ou la perméation du gaz (habituellement faite de métal ou de polymère thermoplastique) et d'une coque extérieure qui assure l'intégrité structurale (habituellement faite d'un métal ou d'un composite de résine thermodurcissable renforcée par de la fibre imprégnée enroulée autour de la chemise intérieure d'étanchéité).

20. Au cours du remplissage, l'hydrogène entre dans le système de stockage par une soupape antiretour. La soupape antiretour évite l'écoulement d'hydrogène en sens inverse dans le tuyau de remplissage.

21. Une vanne d'arrêt de l'hydrogène automatisée empêche toute sortie d'hydrogène stocké lorsque le véhicule n'est pas en fonctionnement ou lorsqu'il est détecté un défaut qui rend nécessaire l'isolement du système de stockage de l'hydrogène.

22. 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 une rupture dangereuse. Les TPRD sont conçus pour évacuer rapidement le contenu entier du réservoir. Ils ne permettent pas la refermeture ou la remise en pression du réservoir. Les réservoirs de stockage et TPRD qui ont été exposés à un incendie doivent être retirés du service et détruits.

b) Système de stockage de l'hydrogène liquéfié

23. Étant donné que l'expérience de l'utilisation réelle des systèmes de stockage de l'hydrogène liquéfié est limitée et s'applique seulement à des parcs de voitures de démonstration, il n'y a pas eu d'évaluation approfondie des prescriptions en matière de sécurité ni de travaux d'examen poussés sur les procédures d'essai en vue de déterminer leur applicabilité et leur pertinence par rapport aux cas de défaillance connus. 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 futur s'appliquant aux véhicules à système de stockage de l'hydrogène liquéfié.

4. Système d'alimentation en hydrogène

24. Le système d'alimentation en hydrogène transfère l'hydrogène depuis le système de stockage jusqu'au système de propulsion à la pression et la température appropriées pour l'alimentation 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 de l'hydrogène liquéfié, l'hydrogène, qu'il soit sous forme liquide ou gazeuse, pourrait être

extrait du système de stockage, puis chauffé à température appropriée avant d'être acheminé vers le moteur à combustion interne ou le système de pile à combustible. Dans le cas des véhicules à système de stockage de l'hydrogène comprimé, il pourrait aussi être nécessaire de soumettre l'hydrogène gazeux à un traitement de conditionnement thermique, particulièrement par des températures juste inférieures à zéro.

25. Le système d'alimentation en carburant doit réduire la pression de l'hydrogène depuis la valeur dans le système de stockage de l'hydrogène jusqu'à la valeur 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 à 70 MPa de PSN, par exemple, il pourra être nécessaire de réduire la pression d'une valeur aussi élevée que 87,5 MPa à moins de 1 MPa à l'entrée du système à pile à combustible, ou en général à moins de 1,5 MPa, respectivement, à l'entrée d'un système à moteur à combustion interne. Cette réduction de pression peut nécessiter l'utilisation de plusieurs étages de détendeurs afin d'obtenir un réglage exact et stable et d'assurer une protection efficace des équipements aval en cas de défaillance du détendeur. La protection contre la surpression du système d'alimentation peut être réalisée par évacuation de l'hydrogène gazeux au moyen de soupapes de décompression ou par coupure de l'arrivée de l'hydrogène (par fermeture de la vanne d'arrêt du système de stockage de l'hydrogène) lorsqu'un cas de surpression aval est détecté.

5. Système de pile à combustible

26. Le système de pile à combustible produit l'électricité nécessaire pour faire fonctionner les moteurs de traction et charger les accumulateurs et les condensateurs du véhicule. Parmi les divers types de piles à combustible existants, les piles à membrane échangeuses de protons (MEP) sont le type couramment utilisé sur les automobiles parce que leur plus basse température de fonctionnement permet de raccourcir le délai de démarrage. Comme les autres piles à combustible, ces piles combinent par voie électrochimique l'hydrogène et l'oxygène (contenu dans l'air) pour produire du courant électrique continu. Les piles à combustible permettent de produire en continu du courant électrique, lorsqu'elles sont alimentées en hydrogène et en oxygène (de l'air), ainsi que de l'eau, sans émissions de dioxyde de carbone (CO₂) ni d'autres polluants typiques produits par les moteurs à combustion fonctionnant à l'essence.

27. Comme il est montré à la figure 1, les systèmes typiques de pile à combustible utilisent un ventilateur soufflant pour envoyer l'air dans l'empilement d'éléments de la pile. Entre 50 et 70 % de l'oxygène envoyé dans l'empilement est consommé par les éléments. Le reste est évacué. L'hydrogène alimentant le système de piles à combustible est en majeure partie consommé dans les cellules, mais un faible excédent d'hydrogène est nécessaire pour protéger les piles à combustible contre une détérioration. L'hydrogène en excès est soit mélangé avec les gaz évacués de manière à produire des gaz non inflammables à la sortie du véhicule, soit traité par réaction catalytique.

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

29. Les éléments individuels sont habituellement raccordés en série par empilement, de telle manière que la tension totale de l'empilement se situe entre 300 et 600 V (courant continu). Étant donné la tension élevée produite par les piles, toutes les connexions 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 de manière efficace par rapport au châssis conducteur du véhicule pour éviter les courts-circuits pouvant endommager l'équipement ou les risques d'électrocution pour les personnes en cas de rupture de la gaine isolante.

6. Moteurs électriques de traction et module de gestion électrique

30. L'énergie électrique produite par le système à pile à combustible est utilisée pour entraîner les moteurs de traction du véhicule. Conformément au schéma de la figure 2, de nombreux véhicules de tourisme à pile à combustible sont du type à traction avant, 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 les systèmes à propulsion arrière, sont aussi possibles. Sur les véhicules du type SUV (gros breaks tout-terrain) à pile à combustible, la configuration peut être à 4 roues motrices, avec des moteurs électriques sur l'essieu avant et sur l'essieu arrière, ou des moteurs compacts disposés dans chaque roue.

31. La «position de l'accélérateur» sert de référence au système de commande des moteurs de traction pour déterminer la puissance à envoyer aux roues motrices. De nombreux véhicules à piles à combustible utilisent des accumulateurs ou des ultracondensateurs comme source d'appoint à l'énergie fournie par les piles à combustible. Sur ces véhicules, il peut y avoir récupération de l'énergie lors du freinage grâce au freinage par récupération, ce qui permet de recharger les accumulateurs ou ultracondensateurs lors de ces phases, et de maximiser ainsi le rendement du véhicule.

32. Les moteurs de traction peuvent être alimentés soit en courant continu, soit en courant alternatif. Pour les moteurs de traction du type alternatif, le système de commande du moteur doit convertir le courant continu produit par les piles à combustible, accumulateurs et ultracondensateurs en courant alternatif. Inversement, si le véhicule est doté du freinage par récupération, le système de commande du moteur de traction doit convertir le courant alternatif produit par le moteur de traction en courant continu afin que l'énergie récupérée puisse être stockée dans les accumulateurs ou ultracondensateurs.

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

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

33. Le présent RTM s'applique aux systèmes de stockage d'hydrogène ayant une pression de service nominale (PSN) inférieure ou égale à 70 MPa et une pression maximale de ravitaillement correspondante de 125 % de la pression de service nominale. Les systèmes à pression de service nominale égale ou inférieure à 70 MPa incluent tous les systèmes de stockage actuellement susceptibles d'être montés sur des applications automobiles du commerce. 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.

34. Le RTM 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 ayant des systèmes de stockage chimique; il s'applique par contre aux véhicules à stockage par absorption physique d'hydrogène gazeux ou liquide.

35. L'infrastructure de ravitaillement en hydrogène établie avant 2010 est utilisable pour les véhicules ayant des pressions de service nominales allant jusqu'à 70 MPa. Le RTM ne traite pas des prescriptions s'appliquant à la station de distribution ou à l'interface station de distribution/véhicule.

36. Le RTM énonce des prescriptions concernant l'intégrité du système de stockage dans les conditions résultant d'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 dans leur réglementation nationale.

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

37. Ces définitions s'appliquent à la qualification du système de stockage de l'hydrogène comprimé pour l'utilisation routière. 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 de l'hydrogène liquéfié et comprimé pour une durée de service inférieure ou égale à 15 ans (par. 5.1). La valeur de la durée de service est spécifiée par le fabricant.

38. La date du retrait de service est la date du calendrier (mois et année) spécifiée pour le retrait de service. La date de retrait de service peut être fixée par une autorité réglementaire. En principe, elle devrait être basée sur la date de mise en service autorisée par le constructeur plus la durée de service.

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

39. Les prescriptions fonctionnelles énoncées au paragraphe 5 s'appliquent à la qualification de la conception pour une utilisation routière.

40. En principe, toutes les Parties contractantes reconnaîtront les véhicules qui satisfont pleinement aux prescriptions du présent RTM comme propres à la circulation routière dans le cadre de leurs juridictions. Les Parties contractantes ayant des systèmes d'homologation de type peuvent prescrire en outre que les véhicules doivent satisfaire à leurs prescriptions concernant la conformité de production, la qualification des matériaux et la fragilisation par l'hydrogène.

41. Il est aussi admis que toute Partie contractante pourra aussi, si elle le désire, établir des prescriptions différentes concernant d'autres véhicules qui seraient qualifiés pour l'utilisation routière dans le cadre de sa juridiction. Ainsi par exemple:

- a) Le présent RTM prescrit l'utilisation d'hydrogène gazeux lors de l'essai au feu des systèmes de stockage de gaz comprimé (par. 6.2.5). Si une Partie contractante décide de qualifier des véhicules pour l'utilisation routière en utilisant soit de l'hydrogène soit de l'air comme gaz d'essai lors des essais au feu, les véhicules qualifiés sur la base de l'utilisation de l'air pourraient être qualifiés pour l'utilisation routière dans la juridiction de cette Partie contractante;
- b) Les véhicules qualifiés pour l'utilisation routière sur la base des prescriptions du présent RTM, notamment l'exécution de 11 000 cycles de pression hydraulique prévue dans les essais du paragraphe 5.1.2, seraient reconnus propres à l'utilisation routière dans toutes les Parties contractantes. Une Partie contractante pourrait décider de qualifier d'autres véhicules pour l'utilisation dans sa juridiction sur la base de 5 500 ou 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 de l'hydrogène comprimé

42. Le confinement de l'hydrogène à l'intérieur du système de stockage de l'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 de confinement qui assurent une rétention primaire de l'hydrogène stocké à haute pression. Cette définition permet de tenir compte des progrès futurs en matière de conception, de matériaux et de construction, qui permettent de réaliser des gains en poids, en volume, en conformabilité ainsi que sur d'autres caractéristiques.

43. *Prescriptions d'essai fonctionnelles*: les prescriptions d'essai fonctionnelles pour tous les systèmes de stockage de l'hydrogène comprimé pour l'utilisation routière des véhicules sont énoncées au paragraphe 5.1. Ces prescriptions prennent en compte les effets subis par les équipements et conditions d'utilisation routière prouvés, afin de garantir une qualification fiable pour l'utilisation réelle. Les essais de qualification ont été établis pour démontrer l'aptitude du système à assurer toutes les fonctions clefs pendant toute la durée de service, y compris les opérations de ravitaillement et de vidage, le stationnement en conditions extrêmes et le comportement en cas d'incendie, tout en garantissant le confinement effectif de l'hydrogène dans le système de stockage. Ces critères s'appliquent à la qualification des systèmes de stockage destinés à être utilisés sur les véhicules neufs.

44. *Conformité de production par rapport aux 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 concernant les essais de vérification fonctionnels 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.

45. *Ordre de présentation des prescriptions*: les prescriptions de qualification de conception du paragraphe 5.1 pour l'utilisation routière comprennent les éléments suivants:

- 5.1.1 Essais de vérification pour les caractéristiques mesurées de référence
- 5.1.2 Essais de vérification pour la durabilité des caractéristiques (essais hydrauliques en séquence)
- 5.1.3 Essais de vérification pour les caractéristiques prévues en utilisation routière (essais pneumatiques en séquence)
- 5.1.4 Essais de vérification des caractéristiques fonctionnelles en fin de service.

46. Le paragraphe 5.1.1 définit les caractéristiques mesurées utilisées dans les autres essais de vérification fonctionnels et dans le contrôle-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 de ravitaillement, de vidage et de stationnement en conditions extrêmes d'utilisation routière sans fuite ou rupture pendant toute la durée de service prescrite. Le paragraphe 5.1.4 donne confirmation que le système se comporte de manière sûre dans le cas d'un incendie, qui justifie le retrait du service.

47. *Degré de rigueur comparable*: la question d'un degré de rigueur comparable à celui des règlements nationaux en vigueur pour l'utilisation routière a été traitée dans le cas des règlements de l'UE dans une évaluation parrainée par l'UE sur la comparaison du degré de rigueur (C. Visvikis (TRL CPR1187, 2011) «Hydrogen-powered vehicles: A Comparison of the European legislation and the draft UNECE global technical regulation»). Le rapport conclut: «Dans l'ensemble, les études ont montré qu'il existe des différences fondamentales

entre la législation européenne et le projet de règlement technique mondial, mais on dispose de données expérimentales ou réelles insuffisantes pour pouvoir déterminer avec certitude quels règlements sont les plus rigoureux. Certains aspects du système de stockage de l'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 rigoureuses 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 existants en matière de sûreté, de vandalisme ou de terrorisme».

Un degré de rigueur comparable par rapport aux règlements nationaux actuels pour l'utilisation routière a été obtenu par un examen des fondements techniques des prescriptions des diverses Parties contractantes en ce qui concerne la sécurité des véhicules en utilisation routière, qui a abouti à la constatation que l'objectif visé en matière de sécurité est effectivement réalisé par le biais des prescriptions du RTM. Deux exemples peuvent être cités:

- a) Premier exemple: Certains règlements nationaux prescrivent que le système de stockage de l'hydrogène comprimé soit soumis à 45 000 cycles de pression hydraulique de remplissage complet sans subir de rupture, à moins qu'une fuite ne survienne auparavant;
- b) Deuxième exemple: Une prescription prioritaire imposant une pression d'éclatement initiale >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 appliquée précédemment pour les réservoirs de GNC basse pression. Les fondements d'une prescription de cette nature concernant la pression d'éclatement pour des réservoirs neufs (non utilisés) ont été examinés. Il n'a pas été possible de faire ressortir un fondement objectif crédible de données réelles comme étant à l'origine des prescriptions traditionnellement appliquées pour les conditions d'utilisation routière. Par contre, des méthodes modernes consistant à identifier les conditions de service rigoureuses sur la base de décennies d'expérience de l'utilisation réelle et la mise au point d'essais de qualification pour reproduire et combiner les conditions extrêmes à cet égard étaient appliquées en vue d'essayer les systèmes dans des conditions démontrant leur aptitude à fonctionner et à survivre à l'exposition de toute une durée de service. Cependant, un facteur de risque dont il a pu être établi qu'il n'avait pas déjà été pris en compte par d'autres prescriptions d'essai, et pour lequel un essai de pression d'éclatement était jugé comme pertinent, était la capacité du réservoir à résister à l'éclatement sous l'effet des incidents de surpressurisation survenant dans les stations de distribution au cours de toute la durée de service. Les conditions d'essai les plus rigoureuses s'appliquent aux réservoirs «en fin de vie» (simulation 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 éclatement 180 % de la PSN pendant 4 min a été adoptée, compte tenu de l'équivalence démontrée de la probabilité de défaillance dans ces conditions et lors d'une exposition à 150 % de la PSN pendant 10 h (sur la base des données sur le délai jusqu'à défaillance pour les composites en fibre de verre dans le «cas le plus défavorable»). On prend en effet pour hypothèse de départ une valeur de surpressurisation maximale imputable à la station de distribution égale à 150 % de la PSN. Des expériences menées sur

des réservoirs fortement isolés, d'autre part, ont démontré que le refroidissement après un réchauffement compressif durait environ 10 h. Une prescription additionnelle correspondant à une pression d'éclatement minimale de 200 % de la PSN pour les réservoirs neufs (non utilisés) a été examinée comme moyen éventuel pour présélectionner les réservoirs neufs ayant la capacité minimale potentielle de survivre à la séquence d'essais de durabilité sous une pression d'éclatement supérieure à 180 % de la PSN, compte tenu d'une marge de tolérance de fabrication (moins de $\pm 10\%$) s'appliquant à la résistance d'un réservoir neuf. Le minimum traditionnel de 225 % de la PSN a été adopté dans ce document en tant que valeur estimative prudente, sans fondement objectif reposant sur des données réelles, mais se basant sur les dispositions antérieures appliquées dans certaines Parties contractantes, étant entendu que l'on disposera à l'avenir de résultats d'examen et de données et d'analyses supplémentaires permettant de confirmer la valeur de 225 % de la PSN ou incitant, selon le cas, à réexaminer la prescription de pression d'éclatement minimale pour les réservoirs neufs.

48. La valeur prescrite au paragraphe 5.1.1.2 (nombre initial de référence de cycles de pression) est de 22 000 cycles. Les 22 000 cycles de remplissage complet correspondent à largement 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 km, la valeur prescrite de 22 000 cycles de pression a été jugée comme offrant une marge substantielle par rapport au kilométrage extrême du véhicule dans le cas le plus défavorable. En second lieu, il existe dans les normes nationales diverses prescriptions garantissant que le système de stockage a une résistance suffisante pour survivre aux expositions à des effets de pression statiques (stationnement) et cycliques (ravitaillement) en gardant une résistance résiduelle. L'aptitude à résister à ces 2 types d'effets a en général été évaluée sur la base d'essais qui sont équivalents à ceux des paragraphes 5.1.2.4, 5.1.2.5 et 5.1.2.6, mais dont chacun était effectué sur un nouveau réservoir. Une prescription supplémentaire prioritaire fixant une pression d'éclatement initiale (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 indirectement des facteurs non reproduits tels que la combinaison d'effets appliqués individuellement et d'effets chimiques/physiques, ainsi que l'aptitude à survivre aux incidents de surpressurisation lors du remplissage. Les prescriptions du RTM, toutefois, permettent de prendre en compte directement ces facteurs par une reproduction effective des effets combinés des contraintes et des effets chimiques et physiques et des cas de surpressurisation. À la différence du cas d'autres carburants gazeux, les prescriptions dans le cas du ravitaillement en hydrogène prévoient des mesures de sécurité pour limiter les surpressurisations potentielles aux cas extrêmes reproduits lors des essais du réservoir. En outre, les prescriptions du RTM garantissent une résistance résiduelle pour les cas de surpressurisation extrêmes en fin de service, avec une résistance résiduelle suffisante pour garantir la capacité à résister à l'éclatement à des pressions proches (à 20 % près) de celle pouvant être supportée par un réservoir neuf. Toutes les prescriptions du RTM sont explicitement fondées sur des données publiées qui établissent une relation claire et quantitative entre les critères d'essai et les aspects spécifiés de la sécurité d'utilisation routière. Ainsi, les critères apportant une preuve indirecte de la sécurité d'utilisation pendant toute la durée de service et en fin de service ont été remplacés par des critères permettant la vérification directe de l'aptitude à garantir la sécurité des caractéristiques en fin de service dans des conditions d'expositions combinées correspondant au cas le plus défavorable; en conséquence, le résultat correspond à un degré de rigueur accru dans les garanties de l'aptitude à garder des caractéristiques sûres pendant toute la durée de service. Les exemples de c) incluent les prescriptions du RTM prévoyant

des essais de cycles de pression effectués avec de l'hydrogène gazeux aux températures extrêmes (par. 5.1.3.2) plutôt qu'à la température ambiante seulement, des essais de perméation effectués avec de l'hydrogène gazeux aux températures extrêmes, des essais en conditions simulées de fin de service (par. 5.1.3.3), des essais de résistance résiduelle en fin de service (par. 5.1.2.7) après exposition aux effets combinés de facteurs de contrainte multiples (par. 5.1.2) et des essais d'exposition à un feu localisé et à un feu enveloppant (par. 5.1.4).

49. Les sections ci-après (par. 5.1.1 à 5.1.4) présentent l'argumentation concernant les prescriptions fonctionnelles énoncées au paragraphe 5.1 en ce qui concerne l'intégrité du système de stockage de l'hydrogène comprimé.

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

50. Les essais de vérification des caractéristiques mesurées de référence répondent à plusieurs fonctions: i) vérifier que les systèmes présentés pour la qualification de la conception (sur le lot de qualification) sont cohérents du point de vue de leurs caractéristiques, ainsi qu'avec les dossiers du fabricant en matière de contrôle-qualité de la production; ii) établir la pression d'éclatement initiale médiane, 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 sont respectées quant à la pression d'éclatement minimale et au nombre de cycles de pression avant perte d'étanchéité.

51. Les prescriptions concernant la pression initiale d'éclatement de référence diffèrent des prescriptions concernant l'essai de pression d'éclatement «en fin de service» qui conclut les séquences d'essais des paragraphes 5.1.2 et 5.1.3. La pression d'éclatement initiale s'applique à un réservoir neuf non utilisé et la pression d'éclatement «en fin de service» concerne un réservoir qui a subi une série d'essais fonctionnels (par. 5.1.2 ou 5.1.3) simulant les conditions d'utilisation dans le cas le plus défavorable et l'exposition aux facteurs environnementaux au cours d'une durée de service complète. Étant donné qu'il y a accumulation de la fatigue au cours de l'utilisation et du fait des conditions d'exposition, on peut s'attendre à ce que la pression d'éclatement «en fin de service» (c'est-à-dire la résistance à l'éclatement) soit inférieure à celle obtenue avec un réservoir neuf et non encore exposé.

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

52. Le paragraphe 5.1.1.1 prescrit de déterminer la pression d'éclatement initiale médiane BP_O , et de vérifier que les pressions d'éclatement initiales des systèmes dans le lot de qualification se situent dans la plage $BP_O \pm 10\%$. BP_O est utilisé comme valeur de référence dans la vérification des caractéristiques (par. 5.1.2.8 et 5.1.3.5) et la vérification de la conformité avec le lot de qualification. Le paragraphe 5.1.1.1 prévoit de vérifier que BP_O est supérieur ou égal à 225 % de la PSN ou à 350 % de celle-ci (pour les composites en fibre de verre), valeurs retenues à titre provisoire car elles ne sont pas fondées sur des données réelles, mais sur les pratiques antérieures. Elles sont prises comme valeurs indicatives en attendant que de nouvelles données ou résultats d'analyses soient disponibles pour un réexamen de cette question au cours de la phase 2 de l'élaboration du présent RTM. Ainsi, par exemple, une prescription fixant une valeur de pression d'éclatement initiale minimale de 200 % peut s'appuyer sur une argumentation objective basée sur des données réelles selon laquelle une prescription fixant une pression d'éclatement en fin de service de plus de 180 % de la PSN (basée sur l'aptitude à survivre aux cas maximaux de

surpressurisation survenant dans les stations de distribution) compte tenu également d'un taux maximal admis de 20 % de baisse de résistance au cours de la durée de service par rapport à la pression d'éclatement initiale médiane de 225 % de la PSN, ce qui correspond à une pression d'éclatement minimale de 200 % de la PSN une fois prise en compte la tolérance de fabrication maximale de 10 % sur la résistance initiale. Dans l'intervalle s'écoulant entre la phase 1 et la phase 2 il sera possible de recueillir de nouvelles données ou résultats d'analyses concernant une valeur minimale de 225 % de la PSN (ou une autre valeur) avant que cette question ait à être tranchée lors de la phase 2.

53. 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 a 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:*

Valeur initiale de référence du nombre de cycles de pression

54. D'après cette prescription, trois (3) réservoirs neufs prélevés au hasard doivent être soumis à un essai des cycles de pression hydraulique allant jusqu'à 125 % de la PSN sans subir de rupture avant 22 000 cycles ou jusqu'à ce qu'il y ait perte d'étanchéité auparavant. La perte d'étanchéité ne doit pas survenir pendant un nombre prescrit de cycles de pression (nombre de cycles). Le choix du nombre de cycles à l'intérieur de la plage 5 500-11 000 relève de la responsabilité des Parties contractantes elles-mêmes. En clair, le nombre de cycles de pression au cours desquels il ne doit pas se produire de perte d'étanchéité (nombre de cycles) ne peut pas être supérieur à 11 000, mais si la Partie contractante le fixe à une valeur plus basse, celle-ci ne doit pas être inférieure à 5 500 cycles pour une durée de service de 15 ans. L'argumentation en ce qui concerne les valeurs numériques appliquées dans cette prescription est exposée ci-après.

a. *Argumentation concernant le critère «perte d'étanchéité devant survenir avant l'éclatement» des prescriptions d'essais de référence du nombre de cycles de pression*

55. Les prescriptions d'essais de référence du nombre de cycles de pression visent à permettre un contrôle initial de la résistance à la rupture sous l'effet des cycles de pression au cours de l'utilisation routière réelle. L'essai doit démontrer soit i) la survenue d'une perte d'étanchéité (qui entraînera l'arrêt du véhicule et nécessitera ultérieurement une réparation du réservoir ou son retrait du service (par. 5.2.1.4.3)) avant qu'il y ait rupture, soit ii) l'aptitude à supporter 22 000 cycles de pression hydraulique de remplissage complet sans rupture ou fuite.

56. Quel que soit le mode de défaillance du réservoir se produisant, cette prescription offre une garantie suffisante de sécurité d'utilisation du réservoir au cours de la durée de vie du véhicule. La distance minimale parcourue avant une perte d'étanchéité du réservoir dépendra d'un certain nombre de facteurs, y compris le nombre de cycles d'essai choisi par la Partie contractante et le kilométrage parcouru à chaque plein pour le véhicule. Quel que soit le cas, le nombre minimal de 5 500 cycles avant perte d'étanchéité, sur la base de 320 km (200 miles) par remplissage, permettrait un kilométrage de plus de 1,6 million de km (1 million de miles) avant que le réservoir subisse une défaillance par fuite. Le scénario du cas le plus défavorable serait la défaillance par rupture, mais avant laquelle le réservoir devrait pouvoir supporter 22 000 cycles. Pour les véhicules ayant une autonomie nominale de circulation sur route de 480 km (300 miles) par plein complet, 22 000 cycles de plein complet correspondent à plus de 10 millions de km (6 millions de miles), ce qui excède toute valeur maximale réaliste du kilométrage parcouru par un véhicule en utilisation routière (voir la discussion au paragraphe 5.1.1.2.2 ci-dessous). Deux cas sont donc à envisager, soit le réservoir a la capacité de résister à la défaillance (par perte

d'étanchéité ou par rupture) lors de l'exposition aux cycles de pression en utilisation routière, soit il y a perte d'étanchéité avant rupture, ce qui empêche toute utilisation ultérieure pouvant potentiellement aboutir à la rupture.

57. Un plus grand nombre de cycles de pression, à savoir 22 000, est prescrit pour la résistance à la rupture (en l'absence de toute perte d'étanchéité survenant au préalable) par rapport au nombre de cycles prescrit pour la résistance à la perte d'étanchéité (à savoir entre 5 500 et 11 000) pour la raison que la plus grande gravité d'une rupture impose de rechercher une moindre probabilité par cycle de pression pour cette forme de défaillance que pour une perte d'étanchéité elle-même moins grave, conformément à la formule: Risque = (probabilité de l'événement) x (gravité de l'événement).

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

b. Argumentation concernant le nombre de cycles d'essai, le nombre de cycles de pression hydraulique lors des essais de qualification: nombre de cycles supérieur ou égal à 5 500 et inférieur ou égal à 11 000

58. Le nombre de cycles d'essai de pression hydraulique doit être prescrit par chacune des Parties contractantes, principalement à cause des différences de kilométrage total parcouru par le véhicule au cours de sa durée de service prévue dans le cas le plus défavorable et de la fréquence de remplissage correspondant au cas le plus défavorable dans différentes juridictions. Les différences concernant le nombre maximal prévu de remplissages sont avant tout liées à des applications commerciales d'utilisation intensive du véhicule comme l'exploitation de taxis, dans laquelle on peut rencontrer des conditions d'exploitation très différentes dans différentes juridictions. On pourra comparer par exemple les données suivantes:

- a) Données concernant le kilométrage enregistré au compteur sur les parcs de véhicules (y compris les taxis) selon le rapport Sierra Research n° SR2004-09-04 exécuté pour le California Air Resource Board (2004). Celui-ci indique le kilométrage total parcouru au cours de la durée de service des véhicules mis à la démolition en Californie. Dans tous les cas, ces données indiquaient des kilométrages totaux inférieurs à 560 000 km (350 000 miles). Sur la base de ces chiffres et d'un kilométrage par plein complet de 320 à 480 km (200 à 300 miles), le nombre maximal de remplissages complets au cours de la durée de service peut être estimé à 1 200-1 800;
- b) Données concernant le kilométrage enregistré au compteur sur les parcs de véhicules (y compris les taxis) d'après un rapport de Transport Canada: Les essais obligatoires de contrôle des émissions appliqués en Colombie britannique, au Canada, indiquaient en 2009 que les 5 véhicules ayant parcouru le kilométrage le plus élevé avaient enregistré des chiffres au compteur de 800 000 à 1 000 000 de km (500 000 à 600 000 miles). Sur la base des chiffres de l'année modèle déclarés pour chacun de ces véhicules, cela correspond à moins de 300 pleins complets par an, soit moins d'un plein complet par jour. Compte tenu de ces chiffres et d'un kilométrage de 320 à 480 km (200 à 300 miles) parcouru par plein complet, le nombre maximal de pleins complets peut être estimé à 1 650-3 100;
- c) Données sur l'utilisation des taxis (poste de travail/jour et jour/semaine) d'après le New York City taxicab fact book (Schaller Consulting, 2006). Ces données indiquent que les cas extrêmes d'utilisation 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 jusqu'à 5 ans. Le kilométrage moyen par an est de 72 000 pour les véhicules exploités à raison de 2 postes par jour et de 7 jours par semaine. Il n'existe pas de données prouvant qu'un véhicule quelconque soit demeuré en utilisation intensive pendant la durée de service complète de 5 ans. Toutefois, en prenant comme hypothèse le cas où un véhicule aurait été ravitaillé jusqu'à 1,5 à 2 fois par jour et serait resté en service pendant la durée maximale de 5 ans s'appliquant aux taxis de la ville de New York, le nombre maximal de pleins au cours de la durée de service du taxi serait de 2 750 à 3 600;

- d) Données sur l'utilisation des taxis (poste/jour et jour/semaine) d'après une enquête de Transport Canada effectuée sur les taxis exploités à Toronto et à Ottawa. Ces données indiquent que l'utilisation intensive courante correspondait à 20 h par jour, 7 jours par semaine, et à des kilométrages journaliers parcourus de 540 à 720 km (335 à 450 miles). Les kilométrages totaux enregistrés au compteur n'étaient pas indiqués. Dans l'hypothèse du cas extrême, un véhicule pourrait demeurer à ce niveau d'utilisation intensive pendant 7 ans (durée de service maximale déclarée pour un taxi); on obtiendrait alors un kilométrage total maximal parcouru de 1,4 à 1,9 million de km (870 000 à 1,2 million de miles). Sur la base de 320 à 480 km (200 à 300 miles) parcourus par plein complet, le nombre de remplissages complets au cours de la durée d'utilisation de 15 ans pourrait être de 2 900 à 6 000. Compte tenu de ces hypothèses s'appliquant à un usage intensif, le nombre minimal de cycles d'essai hydrauliques de qualification à pleine pression pour les systèmes de stockage de l'hydrogène est fixé à 5 500. La valeur limite supérieure du nombre de cycles de pression de remplissage complet est fixée à 11 000, ce qui correspondrait à un véhicule demeurant en utilisation intensive à raison de 2 pleins complets par jour pendant une durée de service total de 15 ans (soit un kilométrage total parcouru de 3,5 à 5,3 millions de km (2,2 à 3,3 millions de miles)).

59. Lors de la fixation du nombre maximal de cycles d'essai, il a été tenu compte du fait qu'en pratique certains types de systèmes de stockage (tels que les systèmes à enveloppe composite produite par enroulement avec chemise intérieure métallique) pourraient ne pas pouvoir être qualifiés pour une utilisation à 70 MPa de pression de service maximale lorsque le nombre de cycles est supérieur à 5 500. En conséquence, lors de la fixation du nombre maximal de cycles à [...], il a été admis que si le nombre de cycles prescrit était fixé à 5 500, certaines Parties contractantes pourraient devoir appliquer des restrictions d'utilisation pour garantir que le nombre de remplissages réels ne dépasse pas le nombre de cycles prescrit.

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

60. L'essai de vérification de la durabilité des caractéristiques en utilisation routière permet de s'assurer que le système est apte à éviter une rupture dans des conditions extrêmes d'utilisation incluant une fréquence de ravitaillement intensive (qui pourrait être associée à un remplacement des composants de la chaîne de traction), des détériorations physiques et des conditions environnementales rigoureuses. Ces essais de durabilité portent sur la résistance structurale à la rupture. Cette prise en compte additionnelle de la résistance à la rupture en conditions extérieures rigoureuses est prescrite pour les raisons suivantes: i) les conséquences d'une rupture sont particulièrement graves; et ii) les effets de la rupture ne peuvent pas être atténués par des mesures secondaires (comme dans le cas des fuites, dont les effets peuvent être atténués par une détection des fuites à bord du véhicule associée

à des mesures correctives). Étant donné que ces conditions extrêmes comportent des effets de contrainte structurale et de fatigue, elles sont exécutées sous forme hydraulique, ce qui permet de répéter un plus grand nombre d'expositions à la contrainte dans un délai d'essai raisonnable.

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

61. Ces hypothèses sont les suivantes:

- a) Service prolongé et intensif dans le cas le plus défavorable = durée de vie en service avec ravitaillement «de vide à plein» exerçant les plus fortes contraintes (125 % de la PSN à 85 °C, 80 % à -40 °C) en utilisation prolongée et intensive; 10 événements de surpressurisation dus à la station de distribution;
- b) Exécution d'essais en séquence reproduisant les conditions routières réelles lorsqu'un même réservoir est soumis à des extrêmes répétés de conditions d'expositions différentes; il n'est pas réaliste en effet de tabler sur le fait qu'un réservoir puisse seulement rencontrer un type d'exposition pendant toute la durée de vie du véhicule;
- c) Service intensif: Exposition aux chocs physiques:
 - i) Choc résultant d'une chute (par. 5.1.2.2) – le risque existe principalement si, au moment de remplacer un ancien système de stockage par un nouveau, un des deux tombe du chariot élévateur. La procédure d'essai prescrit des chutes sous plusieurs angles depuis la hauteur maximale de levage d'un chariot élévateur. Cet essai est destiné à démontrer que les réservoirs ont l'aptitude à survivre à des chocs représentatifs survenant avant l'installation;
 - ii) Dégâts de surface (par. 5.1.2.3) – entailles caractéristiques causées par les brides de fixation, qui peuvent causer une abrasion grave des revêtements protecteurs;
 - iii) Chocs survenant en circulation routière qui peuvent affecter la résistance structurale depuis l'extérieur et/ou pénétrer les 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) Utilisation rigoureuse: exposition aux agents chimiques ambiants routiers (par. 5.1.2.4):
 - i) Les liquides à prendre en compte peuvent être des liquides utilisés à bord des véhicules (électrolyte de batterie et liquide de lave-glace), des substances chimiques utilisées sur les routes ou à proximité (engrais nitraté et liquides alcalins) et des liquides utilisés dans les stations de ravitaillement (alcool et essence);
 - ii) La cause primaire historiquement connue des ruptures de réservoirs de véhicules à haute pression (réservoirs à GNC), autres que l'incendie ou les détériorations physiques, a été la rupture par corrosion sous tension – c'est-à-dire la rupture survenant après une combinaison d'expositions à des substances chimiques corrosives et d'effets de pressurisation;
 - iii) Rupture par corrosion sous tension de réservoirs en composite de verre produit par enroulement sur les véhicules routiers après exposition à l'électronique de batterie. Cet effet a été reproduit par le

protocole d'essai proposé; d'autres substances chimiques ont été prises en compte dans le protocole d'essai une fois reconnu le risque général résultant de l'exposition aux substances chimiques;

- iv) Pénétration des revêtements à la suite de chocs et usure prévisibles en circulation sur route – ces effets peuvent dégrader la fonction des revêtements protecteurs, ce qui est un facteur de risque additionnel reconnu pour la rupture par corrosion sous tension; des moyens de gestion de ce risque sont donc nécessaires;
- e) Nombre extrême de remplissages/vidages

L'argumentation en faveur d'un nombre de cycles d'essai supérieur à 5 500 et inférieur à 11 000 est présentée dans les paragraphes 58 et 59, section E.1 a) *ii) b* du préambule.
- f) Conditions de pression extrêmes pour les cycles de remplissage/vidage (par. 5.1.2.4):
 - i) Les surpressurisations dans les stations de ravitaillement devraient être d'ampleur limitée, étant donné que le cahier des charges des stations de ravitaillement limite celles-ci à 150 % au maximum de la PSN (Cette prescription s'appliquant aux stations de ravitaillement doit être intégrée dans les codes et/ou règlements d'application locaux concernant les stations de ravitaillement.);
 - ii) On ne dispose pas de données recueillies sur le terrain sur la fréquence des défaillances de stations de ravitaillement haute pression causant l'actionnement des systèmes de décompression. L'expérience pratique s'appliquant aux véhicules à GNC donne à penser que les surpressions dues aux stations de ravitaillement n'ont pas contribué de façon notable aux risques de rupture des réservoirs;
 - iii) Pour garantir l'aptitude à résister à des cas multiples de surpressurisation dus à une défaillance de l'équipement des stations de ravitaillement, les prescriptions imposent de démontrer l'absence de fuite après 10 expositions à une pression de remplissage de 150 % de la PSN, suivies par une période de stationnement de longue durée sans apparition de fuite, puis une nouvelle opération de remplissage/vidage.
- g) Conditions environnementales extrêmes pour les cycles de remplissage/vidage (par. 5.1.2.6):

Les statistiques météorologiques indiquent que des températures inférieures ou égales à -40 °C sont rencontrées dans les pays situés au nord du 45° parallèle; et des températures d'environ 50 °C sont rencontrées 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 où il existe des statistiques officielles vérifiables. Les données réelles indiquent que pour environ 5 % des jours on enregistre une température minimale inférieure à -30 °C. Par conséquent, l'exposition prolongée aux températures inférieures à -30 °C correspond à moins de 5 % de la durée de service du véhicule, compte tenu du fait qu'une valeur minimale journalière n'est pas atteinte pendant une durée complète de 24 h. Des exemples de données enregistrées sont donnés sur les sites ci-après (Environnement Canada 1971-2000):

- i) www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climate_normals/results_e.html?Province=ONTpercent20&StationName=&SearchType=&LocateBy=Province&Proximity=25&ProximityFrom=City&StationNumber=&IDType=MSC&CityName=&ParkName=&LatitudeDegrees=&LatitudeMinutes=&LongitudeDegrees=&LongitudeMinutes=&NormalsClass=A&SelNormals=&StnId=4157&;
- ii) www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climate_normals/results_e.html?Province=YTpercent20percent20&StationName=&SearchType=&LocateBy=Province&Proximity=25&ProximityFrom=City&StationNumber=&IDType=MSC&CityName=&ParkName=&LatitudeDegrees=&LatitudeMinutes=&LongitudeDegrees=&LongitudeMinutes=&NormalsClass=A&SelNormals=&StnId=1617&.

h) Utilisation prolongée et rigoureuse:

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 pratique sur une durée de 25 ans, une procédure d'essai accélérée à pression accrue devait être mise au point sur la base de données expérimentales sur les matériaux s'appliquant aux métaux et composites actuellement utilisés, en choisissant le cas le plus défavorable pour la vulnérabilité à la rupture sous tension, en l'occurrence celui des composites renforcés par de la fibre de verre. L'utilisation de données de laboratoire pour établir l'équivalence des conditions d'essai de rupture sous contrainte à 100 % de la PSN pendant 25 ans et d'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 de composite des réservoirs à haute pression en ce qui concerne le temps s'écoulant avant rupture en fonction de la contrainte statique sans exposition aux effets corrosifs sont résumées dans le document Aerospace Corp Report No ATR-92(2743)-1 (1991) et les documents qui y sont cités en référence.

- i) Il n'existe pas actuellement 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 maintenus par leur propriétaire dans cet état, les véhicules abandonnés et les véhicules de collection. C'est pourquoi on a pris comme base pour les prescriptions d'essai 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 une oxydation de la résine) (J. Composite Materials 11, 79 (1977)). Une température de +85 °C a été retenue comme correspondant à l'exposition potentielle maximale, compte tenu du fait que des températures maximales sous capot de +82 °C ont été mesurées par exemple sur un véhicule de couleur foncée stationnant en plein air sur une chaussée en asphalte avec exposition au rayonnement solaire par température ambiante de 50 °C. Dans un autre cas, sur un réservoir de gaz comprimé peint en noir, non protégé, situé sur le plateau d'une camionnette noire stationnée en plein soleil par 49 °C, on a mesuré des températures maximale et moyenne à la surface du réservoir de 87 °C (189 °F) et 70 °C (159 °F), respectivement;

- iii) En ce qui concerne l'expérience de l'utilisation réelle des réservoirs à GNC, on ne connaît pas de cas de rupture par contrainte survenue en utilisation réelle sans exposition aux effets corrosifs (fissuration par corrosion sous tension) ou sans anomalie de conception (réservoir fretté mis sous tension pour la compression de la chemise sans autofrettage). Les essais du paragraphe 5.1.2, incluant un essai d'exposition aux effets chimiques et 1 000 h d'exposition statique à pleine pression, sont destinés à simuler ces cas de défaillance.
- i) Pression d'épreuve résiduelle (par. 5.1.2.7):
 - i) Les surpressurisations dans les stations de ravitaillement devraient être d'ampleur limitée, étant donné que le cahier des charges des stations de ravitaillement limite celles-ci à 150 % au maximum de la PSN (Cette prescription s'appliquant aux stations de ravitaillement doit être intégrée dans les codes et/ou règlements d'application locaux concernant les stations de ravitaillement.);
 - ii) Les données de laboratoire sur la rupture statique par contrainte ont été utilisées pour définir la probabilité équivalente de rupture par contrainte des fibres composites. Il a été démontré que la probabilité de rupture après 4 min à 180 % de la PSN était équivalente à celle obtenue après 10 h à 150 % de la PSN en tant que cas le plus défavorable (SAE Technical Report 2009-01-0012). Les stations de ravitaillement sont censées assurer une protection contre la surpressurisation jusqu'à 150 % de la PSN;
 - iii) Les essais en «fin de service» apportent la garantie que le réservoir résistera à une défaillance par surpressurisation due à la station de distribution pendant toute la durée de service.
- j) Pression d'éclatement résiduelle (par. 5.1.2.8):

La prescription prévoyant une baisse de moins de 20 % 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 $\pm 10\%$ en vue de garantir une résistance à la rupture sur 25 ans de 100 % de la PSN.
- k) Argumentation concernant l'absence d'une prescription d'essai pour le couple de serrage sur l'embase:

Les détériorations au réservoir causées par des erreurs de maintenance n'ont pas été prises en compte parce que ces erreurs, telles que l'application d'un couple de serrage excessif sur l'embase relève des procédures de formation à la maintenance et des outils et mesures de sécurité intrinsèques. Pour les mêmes raisons, les détériorations au réservoir causées par des manipulations malveillantes et intentionnelles ne sont pas prises en compte.
- c) **Argumentation concernant le paragraphe 5.1.3: Essai de vérification pour les caractéristiques attendues en utilisation routière (Essais pneumatiques en séquence)**

62. L'essai de vérification des caractéristiques attendues en utilisation routière 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 par exemple les températures extrêmes) 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 complet, les conditions et la fréquence de remplissage et les conditions de stationnement). Les conditions de service à prévoir incluent une exposition consécutive aux contraintes liées au stationnement et au ravitaillement, car tous les véhicules sont soumis à ces 2 formes d'utilisation et leur aptitude à survivre aux effets cumulatifs de celles-ci est nécessaire pour garantir la sécurité d'utilisation de tous les véhicules au cours du service prévu.

63. Les séquences d'essais pneumatiques exécutées avec 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 d'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 causer des pertes d'étanchéité. Une défaillance par fuite peut être atténuée, au moins en partie, par les mesures de protection secondaires – mesures de surveillance et arrêt du véhicule en cas de nécessité (de façon à maintenir un taux très prudent de risque d'inflammabilité dans un garage), ce qui devrait garantir que des réparations seront effectuées largement à temps avant que la fuite puisse s'aggraver, étant donné que le véhicule est retiré du service.

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

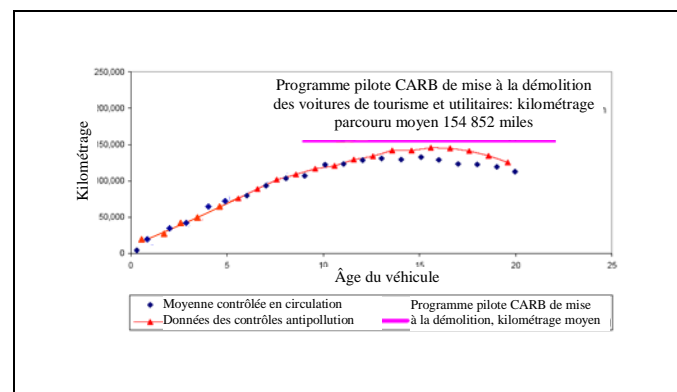
- a) Essai de pression d'épreuve (par. 5.1.3.1) – la production en série de réservoirs à pression inclut un essai de pression de contrôle (pression d'épreuve) au point de production, à la valeur de 150 % de la PSN, c'est-à-dire à 20 % au-dessus de la pression de service maximale, en tant que pratique standard de l'industrie;
- b) Maintien de l'étanchéité par conditions climatiques rigoureuses (par. 5.1.3.2):
 - i) Conditions environnementales prévues – les statistiques météorologiques indiquent que des températures inférieures ou égales à -40 °C sont rencontrées dans les pays situés au nord du 45° parallèle; des températures d'environ 50 °C sont rencontrées dans les zones désertiques de pays situés à des latitudes plus basses; dans chaque cas la fréquence des températures extrêmes rencontrées est d'environ 5 % dans les zones où il existe des enregistrements officiels. Les données dont on dispose indiquent que pour environ 5 % des jours la température minimale est inférieure à -30 °C. Par conséquent l'exposition prolongée aux températures inférieures à -30 °C correspond à moins de 5 % de la durée de vie d'un véhicule, compte tenu du fait qu'une valeur minimale journalière n'est pas atteinte pendant une durée complète de 24 h. Des exemples de données enregistrées peuvent être trouvés sur les sites ci-après (Environnement Canada 1971-2000):
 - a. www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climate_normals/results_e.html?Province=ONTpercent20&StationName=&SearchType=&LocateBy=Province&Proximity=25&ProximityFrom=City&StationNumber=&IDType=MSC&CityName=&ParkName=&LatitudeDegrees=&LatitudeMinutes=&LongitudeDegrees=&LongitudeMinutes=&NormalsClass=A&SelNormals=&StnId=4157&;
 - b. www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climate_normals/results_e.html?Province=YTpercent20percent20&StationName=&SearchType=&LocateBy=Province&Proximity=25&Proximity

From=City&StationNumber=&IDType=MSC&CityName=&ParkName=&LatitudeDegrees=&LatitudeMinutes=&LongitudeDegrees=&LongitudeMinutes=&NormalsClass=A&SelNormals=&StnId=1617&

- 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 4

Kilométrage moyen parcouru par les voitures particulières en fonction de l'âge du véhicule



Source: Sierra Research Report n° 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. Le kilométrage prévu par véhicule par plein complet est considéré comme étant supérieur ou égal 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 = 250 000 miles (500 miles par cycle soit environ 150 000 miles/300 miles par cycle);
- iv. Pour certains véhicules, la distance parcourue par plein complet peut être courte et ils peuvent donc atteindre un nombre supérieur à 500 pleins complets s'il n'y a pas de remplissages partiels au cours de la durée de service du véhicule. La démonstration de la capacité à fonctionner sans perte d'étanchéité au cours de 500 remplissages complets est nécessaire pour prouver l'aptitude fondamentale du système à l'utilisation routière. Le risque présenté par la perte d'étanchéité, cependant, peut être atténué par des mesures secondaires de détection et d'arrêt du véhicule avant que survienne un risque 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 offre une marge importante de fiabilité additionnelle pour la démonstration de l'aptitude à subir sans perte d'étanchéité les remplissages/vidages.
- b. La prescription prévoyant 500 cycles de pression pneumatique pour la qualification peut être considérée comme offrant une marge de sécurité importante compte tenu de l'expérience pratique des défaillances observées en circulation réelle et lors des essais:
 - i. Résultats en circulation réelle: des systèmes de stockage de l'hydrogène à 70 MPa ont présenté des fuites au niveau du joint torique lors de brèves périodes d'utilisation routière (moins de 50 remplissages complets) de véhicules de démonstration;
 - ii. Résultats en circulation réelle: des systèmes de stockage de l'hydrogène à 70 MPa ont présenté des pertes d'étanchéité temporaires (avec rétablissement ultérieur) lors de brèves périodes d'utilisation routière (moins de 50 remplissages complets) de véhicules de démonstration;
 - iii. Résultats en circulation réelle: des défaillances mécaniques de systèmes de stockage du GNC sur les véhicules liées à une intrusion de gaz dans la chemise et dans les couches de l'enroulement ont été constatées lors de brèves périodes d'utilisation routière (moins de 50 remplissages complets);
 - iv. Résultats en circulation réelle: des défaillances de systèmes de stockage du GNC sur les véhicules dues à une accumulation de charges statiques à l'intérieur et à une décharge par effet corona endommageant la chemise; il ne s'agit pas d'un mode de défaillance imputable au réservoir, car la charge statique est véhiculée dans le réservoir par les impuretés du carburant sous forme de particules, or les prescriptions de la norme ISO 14687-2 (et SAE J2719) sur les carburants limitent les concentrations de particules dans l'hydrogène carburant. En outre il est connu que les systèmes à piles à combustible ne tolèrent pas des impuretés sous forme de particules et que ces impuretés sont susceptibles de causer la mise hors service des véhicules s'ils sont ravitaillés avec un carburant inapproprié;
 - v. Expérience acquise lors des essais: des défaillances mécaniques des systèmes de stockage sur les véhicules associées à une intrusion de gaz dans la chemise et dans les couches d'enroulement ont été observées sur environ 50 remplissages complets;

- vi. Expérience acquise lors des essais: des systèmes de stockage de l'hydrogène à 70 MPa qui avaient subi avec succès les essais pour véhicules à gaz naturel (NGV2) ont présenté des défaillances dans les conditions d'essais du paragraphe 5.1.3 selon des modes de défaillances qui sont susceptibles de se produire en utilisation routière. 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 2 défaillances de systèmes avec des réservoirs qui avaient été qualifiés pour le service: des pertes d'étanchéité de la vanne sur des réservoirs composites à chemise en métal et des fuites sur la vanne à solénoïde située à l'intérieur du réservoir, des fuites de réservoirs composites à chemise en polymère dues à une défaillance de la chemise ont été observées. La défaillance par perte d'étanchéité sur le réservoir composite à chemise en polymère concernait un réservoir qui avait été qualifié selon les normes American National Standard Association and Canadian Standards Association (ANSI/CSA) NGV2, modifié pour l'hydrogène. La défaillance de la vanne du réservoir sur le réservoir composite à chemise en métal concernait une vanne qualifiée selon la norme EIFP rev12b. Conclusion du rapport: «Les essais en séquence de la norme SAE TIR J2579 ont révélé que les réservoirs n'ayant pas subi de défaillances connues en service, 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 norme SAE J2601 établit un protocole de remplissage – la durée de 3 min correspond au remplissage le plus rapide «de vide à plein» (comparable à un ravitaillement typique avec de l'essence; ces conditions existent dans les stations de ravitaillement à l'hydrogène existantes dotées d'un équipement moderne); la température du carburant pour un remplissage rapide à 70 MPa est d'environ -40 °C;
- b. Les conditions de choc thermique maximales prévues s'appliquent à un système stabilisé à une température ambiante d'environ 50 °C, 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 intérieur à environ +20 °C;
- c. Les contraintes de remplissage sont intercalées avec les contraintes lors du stationnement.

- c) Stationnement réservoir plein sans perte d'étanchéité (par. 5.1.3.3)
- i) Les fuites et la perméation sont des facteurs de risque pour l'incendie lors du stationnement dans les espaces confinés tels que les garages;
 - ii) La limite des fuites/de la perméation est fonction des nombreuses combinaisons possibles de véhicules et de garages, et des conditions d'essai associées. La limite des fuites/de la perméation est fixée de manière à empêcher la concentration d'hydrogène d'atteindre 25 % de la limite inférieure d'inflammabilité en volume dans les pires conditions plausibles représentées par un garage de petit volume très chaud (55 °C) ayant un taux d'échange de l'air bas (0,03 échange d'air en volume par heure). La limite inférieure d'inflammabilité très prudente de 25 % est par convention adoptée pour tenir compte de l'inhomogénéité des concentrations. 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, taux de change de l'air et températures, ainsi que les méthodes de calcul sont présentées dans l'étude de référence ci-après élaborée dans le cadre du Réseau d'excellence (NoE) HySafe de la CE: P. Adams, A. Bengaouer, B. Cariteau, V. Molkov, A. G. Venetsanos, «Allowable hydrogen permeation rate from road vehicles», Int. Journal of Hydrogen Energy, volume 36, numéro 3, 2011, p. 2742 à 2749;
 - iii) La limite résultante des fuites, mesurées à 55 °C et 115 % de la PSN (remplissage complet à 55 °C) après exécution de cycles prescrits de pression pneumatique sur le système de stockage, peut être calculée par simple proportionnalité en fonction de la taille du véhicule sur la base d'une valeur nominale de 150 ml/min pour un volume de garage de 30,4 m³. Le facteur d'échelle, $R = (V_{\text{largeur}} + 1) * (V_{\text{hauteur}} + 0,05) * (V_{\text{longueur}} + 1)/30,4$, tient compte de variantes de combinaisons garage-véhicule par rapport à celle utilisée pour le calcul du taux et tient compte également du fait que des véhicules plus petits pourraient être stationnés dans des garages plus petits. Ces prescriptions de perméation au niveau du véhicule sont cohérentes avec les propositions élaborées par le projet UE (NoE) HySafe (voir référence ci-dessus). Les valeurs de perméation mesurées pour les systèmes de réservoirs de stockage individuels utilisés sur un véhicule seraient au total inférieures à la limite s'appliquant au véhicule;
 - iv) Pour faciliter les essais de conformité, cependant, les prescriptions concernant la perméation ont été rapportées au système de stockage et non pas à l'ensemble du véhicule (iii). Cette méthode de contrôle est cohérente avec les propositions élaborées par le projet UE (NoE) HySafe. Dans ce cas, la valeur limite de perméation mesurée à 55 °C et à 115 % de la PSN est fixée à 46 ml/h/l de contenance en eau du système de stockage. Si la capacité totale en eau du système de stockage du véhicule est inférieure à 330 l, et pour un volume du garage d'au moins 50 m³, cette valeur donne une concentration d'hydrogène en conditions stabilisées d'au plus 1 %. (Une limite supérieure par système de stockage de 46 ml/h/l (par unité de capacité en volume du réservoir) x 330 l (capacité en volume du système) / 60 min/h = 253 ml/min par système de stockage, comparable à la valeur calculée sur la base de l'approche alternative 150 ml/min

x 50/30,4 = 247 ml/min (facteur d'échelle R = 1,645), donne une valeur de concentration de 1 %.) Cette valeur limite de perméation a été adoptée sur la base de l'hypothèse selon laquelle une capacité de stockage d'environ 330 l n'est pas à prévoir pour les véhicules entrant dans le champ du présent RTM, et donc qu'un volume du garage de moins de 50 m³ peut être pris en compte;

- v) La pression maximale d'un réservoir rempli à plein à 55 °C est de 115 % de la PSN (charge équivalente à celle obtenue à 125 % de la PSN à 85 °C et à 100 % de la PSN à 15 °C);
 - vi) Un essai de fuite localisée doit être exécuté pour vérifier qu'une fuite vers l'extérieur ne permet pas d'entretenir une flamme qui pourrait affaiblir les matériaux du réservoir et causer ultérieurement une rupture. D'après le rapport Technical Report 2008-01-0726 («Flame Quenching Limits of Hydrogen Leaks»), le débit le plus faible de H₂ qui puisse entretenir une flamme est de 0,028 mg/s à partir d'un raccord de compression typique et la plus faible fuite possible à partir d'une configuration de brûleur miniature est de 0,005 mg/s. Étant donné que la configuration du brûleur miniature est considérée comme une configuration fondée sur le «cas le plus défavorable» et offrant une marge de sécurité, le critère maximal de fuite est fixé à 0,005 mg/s;
 - vii) Le stationnement prolongé du véhicule permet l'apparition d'effets tels que la saturation en hydrogène des couches intermédiaires de l'enroulement, de l'interface enroulement/chemise, des matériaux de la chemise, des raccords, des joints toriques et assemblages; 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;
 - viii) En prescrivant que la qualification doit se faire dans les conditions du cas le plus défavorable plausible d'une température élevée, des cycles de pression et de la saturation par l'hydrogène, l'essai de vérification de la perméation permet de lever les incertitudes sur la relation perméation/température, et sur une détérioration à long terme en fonction du temps et de l'utilisation.
- d) Pression d'épreuve résiduelle (par. 5.1.3.4)
- i) Les cas de surpressurisation dans les stations de ravitaillement sont limités par des prescriptions s'appliquant à ces stations à une valeur inférieure ou égale à 150 % de la PSN. (Cette prescription s'appliquant aux stations de ravitaillement doit être énoncée dans les codes/règlements locaux s'appliquant aux stations de ravitaillement.);
 - ii) Les données de laboratoire sur la rupture statique par contrainte ont été utilisées pour définir la probabilité équivalente de rupture par contrainte des fibres composites. Il a été démontré que la probabilité de rupture après 4 min à 180 % de la PSN était équivalente à celle obtenue après 10 h à 150 % de la PSN dans le cas le plus défavorable (SAE Technical Report 2009-01-0012). Les stations de ravitaillement sont censées assurer une protection contre la surpressurisation jusqu'à 150 % de la PSN;

iii) On ne dispose pas de données recueillies sur le terrain sur la fréquence des défaillances des stations de ravitaillement à haute pression causant l'actionnement des dispositifs de décompression. Le petit nombre de stations de ravitaillement à 70 MPa actuellement existant ne permet pas d'établir de statistiques fiables.

e) Résistance d'éclatement résiduelle (par. 5.1.3.5)

La prescription prévoyant une baisse de moins de 20 % de la pression d'éclatement après la durée de service prévue a pour objet de garantir la stabilité des composants structuraux responsables de la résistance à la rupture; elle est liée (selon le document SAE Technical Report 2009-01-0012) à la prise en compte d'une tolérance de fabrication de ± 10 % en vue de garantir une résistance à la rupture sur 25 ans de 100 % de la PSN conformément au paragraphe 5.1.2.5.

En ce qui concerne la chemise du réservoir, il est suggéré de porter attention à la question de la détérioration des chemises de réservoirs. Celles-ci pourraient être inspectées après l'essai d'éclatement. Il serait alors possible de détecter toute trace de détérioration de la chemise et du raccordement chemise/embase d'extrémité, telle que fissuration par fatigue, décollement des couches plastiques, détérioration du joint, ou dommages causés par des décharges électrostatiques. Le rapport des constatations devrait être communiqué au fabricant.

Il est à prévoir que les institutions réglementaires et constructeurs vont effectuer un suivi de l'état et des caractéristiques des systèmes de stockage au cours de leur durée de service; ils disposeront ainsi d'un moyen pratique et efficace pour s'assurer en continu que les prescriptions fonctionnelles du paragraphe 5.1.3 répondent aux besoins de la sécurité sur route. Ce conseil vise à encourager les fabricants et institutions réglementaires à poursuivre la collecte de nouvelles données.

d) Argumentation concernant les paragraphes 5.1.4 et 6.2.5: Essai de vérification de la résistance au feu dans les conditions justifiant le retrait du service

64. La vérification des caractéristiques dans les conditions de retrait du service vise à prévenir la rupture dans des conditions si sévères que l'hydrogène ne peut plus être maintenu confiné dans le réservoir. L'incendie est le seul état justifiant le retrait du service pris en compte pour la qualification et la conception.

65. Un examen approfondi des cas de défaillance des réservoirs GNC en service au cours de la dernière décennie (SAE Technical Paper 2011-01-0251 (Scheffler, McClory *et al.*, «Establishing Localized Fire Test Methods and Progressing Safety Standards for FCVs and Hydrogen Vehicles»)) a révélé que la majorité des cas d'incendie s'étaient produits sur des systèmes de stockage qui n'utilisaient pas de dispositifs de décompression correctement conçus, et que dans les autres cas les dispositifs de décompression n'avaient pas fonctionné de la manière prévue pour protéger le réservoir, du fait que le dispositif n'avait pas été exposé suffisamment à la chaleur, alors que l'exposition localisée aux flammes en un autre point avait attaqué la paroi du réservoir, ce qui en fin de compte avait causé l'éclatement de celui-ci. Le cas de l'exposition localisée au feu, en effet, n'avait pas été traité dans les règlements ou normes antérieurs. La méthode de l'essai d'exposition au feu prescrite au paragraphe 6.2.5 traite à la fois de l'exposition à un feu localisé et à un feu enveloppant.

66. Les conditions de l'essai au feu au paragraphe 6.2.5 ont été basées sur des essais au niveau du véhicule menés par le Japanese Automobile Research Institute (JARI) et les constructeurs des États-Unis. Un résumé des données est présenté dans le document SAE Technical Paper 2011-01-0251. Les principales constatations sont résumées ci-après:

- a) Près de 40 % des incendies de véhicules en laboratoire étudiés ont engendré des conditions qui pouvaient être rangées dans la catégorie des expositions localisées, car les données indiquent qu'un réservoir composite de gaz comprimé pouvait avoir été endommagé localement avant que les dispositifs de décompression classiques montés sur l'embase d'extrémité (c'est-à-dire loin du point d'exposition aux flammes) aient pu être actionnés. (Note: Une température de 300 °C a été choisie comme température critère de l'exposition localisée, car l'analyse gravimétrique thermique indique que le matériau du réservoir commence à se dégrader rapidement à cette température);
- b) Alors que les foyers d'essai en laboratoire brûlaient souvent pendant 30 à 60 min, le délai s'écoulant avant dégradation des réservoirs lors des essais localisés était de moins de 10 min;
- c) La moyenne de la température maximale au cours de la période d'exposition localisée aux flammes était inférieure à 570 °C, avec des pointes de températures atteignant entre 600 °C et 880 °C dans certains cas;
- d) La montée de la température de pointe vers la fin de la période d'exposition localisée aux flammes marquait souvent la transition vers l'état de feu enveloppant.

67. Sur la base des constatations ci-dessus, il a été décidé d'adopter le profil de température prescrit dans le paragraphe 6.2.5. Le fait de choisir la température de 600 °C comme température minimale pour la période d'exposition localisée aux flammes garantit que la température moyenne et la durée de l'exposition localisée sont conformes aux données d'essai. Des thermocouples situés à 25 ± 10 mm de la surface extérieure de l'article soumis à l'essai sont utilisés pour contrôler l'apport thermique et pour confirmer que le profil de température requis est respecté. Afin d'améliorer la réactivité et la facilité de réglage du foyer lors de l'essai (ainsi que la reproductibilité des résultats), on a prescrit l'utilisation d'un feu de gaz de pétrole liquéfié (GPL) et d'écrans pare-vent. D'après l'expérience acquise, la plage de contrôlabilité des flammes de GPL sera d'environ ± 100 °C en conditions extérieures, ce qui permettra d'obtenir des températures de pointe également conformes aux résultats des essais.

68. Le montage proposé pour l'essai d'exposition à un feu localisé est basé sur des travaux préliminaires menés par Transport Canada et la National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) des États-Unis d'Amérique, mais le champ de cette méthode a été élargi pour permettre la qualification du système de stockage, soit par un essai d'installation générique, soit par un essai d'installation spécifique sur un véhicule. Les 2 méthodes diffèrent sur les points suivants:

- a) L'essai générique (non spécifique à un véhicule) permet d'appliquer la méthode d'essai d'exposition localisée aux flammes à plus d'un véhicule, mais les dispositifs de protection (tels que des écrans) doivent être fixés de manière permanente au système de stockage essayé et doivent protéger le système complet, et non pas seulement la zone exposée localement aux flammes. La dimension de la surface d'essai pour l'essai générique a été fixée à 250 ± 50 mm en longueur, avec une largeur correspondant au diamètre du réservoir;

- b) L'installation d'essai pour un véhicule spécifique serait adaptée pour coïncider avec la zone réelle d'exposition aux flammes et elle inclurait les caractéristiques de protection montées sur le véhicule. Si le constructeur du véhicule choisit d'appliquer la méthode pour un véhicule spécifique, la direction et les dimensions de la zone d'exposition localisée aux flammes doivent être adaptées pour tenir compte des caractéristiques du véhicule telles que les ouvertures d'allégement ou orifices de passage des câbles et tuyauteries dans les tôles métalliques adjacentes ou les ouvertures formées par la fusion des matériaux sur le passage de la flamme. Si ces orifices et ouvertures sont de petite taille, la dimension de la zone d'essai localisée est réduite par rapport à la zone d'essai pour l'essai générique pour rendre les conditions plus rigoureuses et réalistes.

e) **Argumentation concernant les paragraphes 5.1.5 et 6.2.6: Essais de qualification pour les dispositifs de fermeture des systèmes de stockage**

69. La fiabilité et la durabilité des dispositifs de fermeture sur les conduits d'hydrogène sont capitales pour l'intégrité de l'ensemble du système de stockage. La qualification de ces dispositifs de fermeture se fait en partie par le contrôle de leurs fonctions dans les essais de caractéristiques au niveau du système (par. 5.1). Ces dispositifs de fermeture sont en outre qualifiés individuellement, non seulement afin de garantir une fiabilité exceptionnelle pour ces éléments mobiles, mais aussi pour permettre leur échange par des composants équivalents dans un système de stockage sans qu'une requalification de l'ensemble du système de stockage soit nécessaire. Les dispositifs de fermeture qui retiennent l'hydrogène à haute pression et l'empêchent de s'échapper vers le reste du système d'alimentation et vers l'environnement sont les suivants:

- a) Le dispositif de décompression thermocommandé (TPRD). Ce dispositif s'ouvre et reste ouvert lors d'une exposition du système au feu;
- b) Soupape antiretour. Une soupape antiretour empêche le reflux de l'hydrogène vers l'amont dans le tuyau de ravitaillement du véhicule;
- c) 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, qui est par défaut en position fermée en l'absence d'énergie électrique.

70. Les procédures d'essai pour la qualification des dispositifs de fermeture du système de stockage de l'hydrogène ont été élaborées par l'Organisation internationale des constructeurs d'automobile (OICA) à l'issue de discussions des sous-groupes TPRD1:2009 et HGV3.1 du CSA (document non encore publié) et sur la base des rapports des essais des sous-groupes du CSA parrainés par le département DOE des États-Unis d'Amérique et exécutés au Laboratoire Powertech pour vérifier les procédures d'essai des dispositifs de fermeture en cours de discussion au sein du CSA. Les prescriptions du présent RTM et celles du CSA diffèrent principalement par leur champ d'application car les secondes englobent toutes les applications sur route notamment les véhicules utilitaires lourds.

i) *Argumentation concernant les prescriptions de qualification des dispositifs de décompression thermocommandés*

71. Les prescriptions de qualification prévoient de vérifier que le dispositif, lorsqu'il est actionné, évacue totalement le contenu du réservoir à carburant, même en fin de vie utile, après qu'il a été exposé aux cycles de pression de remplissage/vidage et aux variations de température et facteurs environnementaux. Il est contrôlé que le débit est suffisant pour l'application donnée par l'essai d'exposition aux flammes du système de stockage d'hydrogène (par. 5.1.4).

ii) *Argumentation concernant les prescriptions de qualification de la soupape antiretour*

72. Ces prescriptions n'ont pas pour objet de faire obstacle à la conception et à la fabrication de composants (composants à fonctions multiples par exemple) qui ne sont pas expressément prescrits dans le présent Règlement, à condition que ces variantes aient été prises en compte lors de l'essai des composants. Pour la prise en compte des variantes de conception ou de fabrication, les matériaux ou méthodes utilisés doivent être évalués par le laboratoire d'essai en vue de garantir des caractéristiques équivalentes et l'application d'un concept raisonnable de sécurité conforme à celui des prescriptions du présent Règlement. Dans ce cas, le nombre d'échantillons et l'ordre des essais applicables doivent être fixés par accord entre le fabricant et le laboratoire d'essai. Sauf autres spécifications, 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 14687-2 (Carburant hydrogène – Spécification de produit). Le nombre total de cycles de fonctionnement doit être de 11 000 (cycles de ravitaillement) pour la soupape antiretour et 50 000 (cycles de fonctionnement) pour la vanne d'arrêt automatique.

73. Le système de coupure du débit par une vanne d'arrêt automatique montée sur un réservoir de stockage d'hydrogène comprimé doit être du type à sécurité intrinsèque. Le terme «à sécurité intrinsèque» s'applique à un dispositif qui revient automatiquement sur le mode sécurité ou garantit une coupure complète et sûre pour tous les modes de défaillance plausibles.

74. Les essais électriques pour la valve d'arrêt automatique montée sur les réservoirs de stockage d'hydrogène comprimé (par. 6.2.6.2.7) apportent la garantie que ces dispositifs fonctionnent: i) dans le cas d'une surélévation de la température causée par une surtension; et ii) dans le cas d'une défaillance potentielle de l'isolation entre le conducteur électrique du composant et le boîtier du composant. L'objet de l'essai d'exposition à l'hydrogène prérefroidi (par. 6.2.6.2.10) est de vérifier que tous les composants situés sur le trajet de l'hydrogène à partir de l'orifice de remplissage du réservoir qui sont exposés à de l'hydrogène prérefroidi au cours du remplissage peuvent continuer de fonctionner de manière sûre dans ces conditions.

f) **Argumentation concernant le paragraphe 5.1.6: Étiquetage**

75. L'objet de prescrire un étiquetage minimal sur les réservoirs de stockage de l'hydrogène est triple: i) indiquer la date à laquelle le système devrait être retiré du service; ii) enregistrer les informations nécessaires pour la traçabilité des conditions de fabrication en cas de défaillances ou d'utilisation; 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 prescrire des dispositions supplémentaires concernant l'étiquetage. Étant donné, par exemple, que le nombre de cycles de pression appliqué pour la qualification conformément au paragraphe 5.1.1.2 peut varier entre Parties contractantes, ce nombre devrait être inscrit sur chaque réservoir.

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

a) **Prescriptions s'appliquant à l'utilisation**

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

76. L'embout de remplissage du véhicule devrait être conçu pour garantir que la pression de remplissage est compatible avec le système de stockage du carburant du véhicule. Des exemples de modèles 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 de remplissage pour informer le préposé au remplissage/conducteur/propriétaire du véhicule du type de carburant (hydrogène liquéfié ou gazeux), de la valeur de la PSN et de la date de retrait du service du système. Les Parties contractantes peuvent prescrire des dispositions supplémentaires en matière d'étiquetage.

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

77. Le système d'alimentation d'hydrogène situé en aval d'un détendeur doit être protégé contre les surpressions dues à une défaillance éventuelle du détendeur.

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: Système de décompression

78. Le tuyau d'évacuation des gaz des systèmes de décompression du système de stockage (dispositifs de décompression commandés par la chaleur et détendeurs) doit être protégé par un capuchon pour éviter qu'il puisse être bloqué par des corps étrangers tels que sable, graviers ou glace.

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

79. Pour garantir que les gaz d'échappement provenant du véhicule sont non dangereux, il a été établi des essais fonctionnels pour démontrer que les gaz évacués sont ininflammables. Les mesures faites sur une valeur moyenne de 3 s glissantes permettent d'admettre les concentrations transitoires très brèves non dangereuses pouvant aller jusqu'à 8 % sans inflammation. Des essais sur les gaz évacués ont montré que la flamme d'une source d'inflammation se propage facilement pour une concentration d'hydrogène supérieure à 10 %, mais que par contre elle ne se propage pas au-dessous de 8 % (SAE Technical Report 2007-01-437, Corfu *et al.*, «Development of Safety Criteria for Potentially Flammable Discharges from Hydrogen Fuel Cell Vehicles»). En limitant la concentration d'hydrogène de tout pic instantané à 8 %, on évite les risques pour les personnes situées près du point d'évacuation même en présence d'une source d'inflammation. La fenêtre de mesure de la moyenne glissante est fixée de manière à garantir que l'espace entourant le véhicule demeure non dangereux même lorsque l'hydrogène évacué se diffuse dans l'air ambiant; cela peut être 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 règlements de construction des États et des municipalités, ainsi que les normes internationalement reconnues comme la norme CEI (Commission électrotechnique internationale) 60079 prescrivent que dans un espace, la concentration doit être inférieure à 25 % de la limite inférieure d'inflammabilité (LII) (soit 1 % d'hydrogène) en volume. La fenêtre de mesure de la moyenne glissante a été fixée en partant de l'hypothèse d'un débit d'évacuation d'hydrogène extrêmement élevé, équivalent à ce qui est produit par une pile à combustible de 100 kW. On a ensuite calculé le temps nécessaire pour que cette quantité déchargée remplisse l'espace nominal occupé par un véhicule de tourisme (4,6 m x 2,6 m x 2,6 m) jusqu'à 25 % de la LII. La limite de durée résultante, sur la base de calculs offrant une marge de sécurité importante, a été évaluée à 8 s pour le calcul d'une «moyenne glissante», ce qui démontre que la durée de 3 s de la moyenne glissante appliquée dans le présent document est plus que raisonnable et tient compte des variations éventuelles de dimension 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, la mesure sur 3 s de la moyenne glissante nécessite une

valeur de réponse du capteur (90 % de la valeur de lecture) et une vitesse d'enregistrement de moins de 300 ms.

iv) *Argumentation concernant le paragraphe 5.2.1.4: Protection contre les risques d'inflammation*

80. Risques en cas d'une défaillance unique. Des situations dangereuses peuvent se produire si une fuite non intentionnelle d'hydrogène atteint des concentrations inflammables:

- a) Une défaillance unique survenant en aval de la principale vanne d'arrêt d'hydrogène ne doit pas causer la présence d'une concentration quelconque d'hydrogène dans l'air où que ce soit dans l'habitacle;
- b) La protection contre la présence d'hydrogène dans l'air dans des espaces fermés ou semi-fermés à l'intérieur du véhicule contenant des sources d'inflammation non protégées est une mesure essentielle:
 - i) Sur les véhicules, cet objectif peut être atteint par conception (par exemple par ventilation des espaces pour empêcher l'accumulation d'hydrogène);
 - ii) Si le véhicule réalise cet objectif par détection de concentrations d'hydrogène dans l'air égales ou supérieures à $2 \pm 1,0$ %, le conducteur doit être averti par le signal d'alarme. Si la concentration d'hydrogène dépasse $3 \pm 1,0$ % en volume dans l'air dans des espaces fermés ou semi-fermés du véhicule, la vanne d'arrêt principale d'hydrogène doit se fermer pour isoler le système de stockage.

v) *Argumentation concernant le paragraphe 5.2.1.5: Fuite de carburant*

81. Aucune fuite détectable n'est autorisée.

vi) *Argumentation concernant le paragraphe 5.2.1.6: Système d'alarme par signal visuel*

82. Un système d'alarme par signal visuel doit être présent pour avertir le conducteur en cas de fuite d'hydrogène causant une élévation des niveaux de concentration à une valeur égale ou supérieure à 4 % en volume dans l'habitacle, le compartiment à bagages et les espaces où il existe des sources d'inflammation non protégées sur le véhicule. Le système d'alarme par signal visuel devrait aussi avertir le conducteur en cas de défaut de fonctionnement du système de détection d'hydrogène. En outre, le système de coupure doit être capable de répondre à l'un ou l'autre scénario et d'avertir instantanément le conducteur. Le voyant de coupure du circuit hydrogène doit être situé dans l'habitacle devant le conducteur et de manière bien visible pour celui-ci. En ce qui concerne le signal d'alarme visuel, aucune donnée disponible jusqu'ici ne semble indiquer que la fonction d'alerte du signal soit moins efficace s'il s'agit d'un signal visuel seulement. En cas d'une défaillance du système de détection, le voyant lumineux d'alarme devrait être jaune. En cas de fermeture d'urgence de la vanne, le voyant lumineux devrait être rouge.

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

83. (Information de base pour l'interprétation du paragraphe 3.34): La limite inférieure d'inflammabilité est la plus basse concentration de carburant dans l'air à laquelle un mélange de gaz soit inflammable. Les organismes nationaux et internationaux de normalisation (tels que la National Fire Protection Association (NFPA) et la CEI) fixent à 4 % d'hydrogène en volume dans l'air la limite de la LII (US Department of Interior,

Bureau of Mines Bulletin 503, 1952; Houf and Schefer, «Predicting Radiative Heat Fluxes and Flammability Envelopes from Unintended Releases of Hydrogen», International Journal of Hydrogen Energy 31, p. 136 à 151, 2007; NASA RD-WSTF-0001, 1988). La LII, qui dépend de la température, de la pression et de la présence de gaz de dilution, a été déterminée à l'aide de méthodes d'essai spécifiques (American Society for Testing (ASTM) E681-04). Alors que la valeur de LII de 4 % apparaît appropriée pour l'évaluation de l'inflammabilité dans l'environnement général des véhicules ou à l'intérieur de l'habitacle, ce critère peut être excessivement restrictif dans les endroits où les gaz s'écoulent librement, pour lesquels l'inflammation nécessite une concentration de plus de 4 % d'hydrogène. 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 4 % d'hydrogène dans un mélange stagnant à température ambiante, la combustion peut seulement se propager vers le haut. À environ 8 à 10 % d'hydrogène dans le mélange, la combustion peut aussi se propager vers le bas et dans les directions horizontales et le mélange est facilement inflammable quel que soit l'emplacement de la source d'inflammation. Coward, H. F. *et al.*, «Limits of flammability of gases and vapors», Bureau of Mines Bulletin 503; 1952, USA; 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 141, 2007.

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

84. Étant donné qu'un règlement technique basé sur des critères fonctionnels ne peut pas inclure des prescriptions d'essai couvrant chaque scénario possible, cette section vise à établir pour les fabricants une liste de points à prendre en considération lors de la conception des systèmes d'alimentation en hydrogène, en vue de réduire 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 pour réduire au minimum le risque de fuites d'hydrogène (ce qui veut dire réduire le plus possible les raccordements par tuyauterie);
- b) Le système d'alimentation en hydrogène devrait supporter sans problème les conditions de service, du point de vue chimique, électrique, mécanique et thermique, qui peuvent être rencontrées au cours de l'utilisation normale 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 telle manière qu'il soit protégé contre les détériorations en conditions normales d'utilisation;
- e) Les tuyauteries rigides de carburant devraient être maintenues en place de telle manière qu'elles ne puissent 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 composant du système d'alimentation en hydrogène, y compris les matériaux de protection faisant partie de ces composants, 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: Limite des fuites après un choc

85. Les valeurs de fuites admissibles après un choc appliquées dans la norme Federal Motor Safety Standard (FMVSS) 301 des États-Unis d'Amérique et dans les Règlements n^{os} 94 et 95 se situent à 6 % l'une de l'autre pour la période de 60 min suivant le choc. Étant donné que les valeurs sont très proches, celle du Règlement n^o 94, de 30 g/min, a été retenue comme base pour les calculs pour définir un taux de fuites d'hydrogène admissible après un choc dans le présent RTM.

86. Le critère appliqué pour le taux de fuites d'hydrogène après un choc est basé sur le principe d'admettre une valeur d'énergie de combustion équivalente à celle autorisée pour les véhicules à essence. Sur la base d'un pouvoir calorifique inférieur ou égal à 120 MJ/kg pour l'hydrogène et à 42,7 MJ/kg pour l'essence selon les données du manuel DOE Transportation Data Book des États-Unis, le taux de fuite admissible équivalent de l'hydrogène peut être déterminé comme suit:

$$V_H = 30 \text{ g/min fuite d'essence} \times \frac{42,7 \text{ MJ/kg}}{120 \text{ MJ/kg}} = 10,7 \text{ g/min fuite d'hydrogène}$$

pour les véhicules équipés soit d'un système de stockage d'hydrogène comprimé soit d'un système de stockage d'hydrogène liquéfié. La perte admissible totale d'hydrogène par conséquent est égale à 642 g pour la période de 60 min suivant le choc.

87. Le débit de fuite admissible d'hydrogène peut aussi être exprimé en termes volumiques à température normale (0 °C) et pression normale comme suit:

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

pour les véhicules équipés soit d'un système de stockage d'hydrogène comprimé soit d'un système de stockage d'hydrogène liquéfié.

88. Afin de confirmer la validité du débit de fuite d'hydrogène, la JARI a effectué des essais d'inflammation de fuites d'hydrogène variant de 131 NI/min à 1 000 NI/min sous un véhicule et à l'intérieur du compartiment moteur. 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 n'étaient pas suffisamment importants (même à un débit de fuite de 1 000 NI/min) pour endommager la partie plancher du véhicule, ou pour causer l'ouverture du capot-moteur, ou pour causer des dommages physiques à 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»). Le réservoir doit demeurer fixé au véhicule par au minimum un point de fixation.

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

89. 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 le choc. Le critère a été fixé à une valeur prudente de 4 % d'hydrogène en volume, car cette valeur représente le niveau le plus

bas possible auquel une combustion puisse se produire (et il s'agit d'une combustion très peu énergétique à cette valeur). Étant donné que l'essai est mené en parallèle avec l'essai de fuite après le choc et s'étend donc sur une durée d'au moins 60 min, il n'est pas nécessaire de prévoir une marge pour la prise en compte des zones de dilution car il existe un délai suffisant pour que l'hydrogène puisse se diffuser dans tout le compartiment.

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

90. L'un des règlements de sécurité en cas de choc s'appliquant aux véhicules à système de stockage du gaz comprimé est le règlement CMVSS 301 (Canada's Motor Vehicle Safety Standard) qui inclut des dispositions caractéristiques concernant notamment l'installation du réservoir de carburant, en vue de prévenir son déplacement.

3. Prescriptions concernant la sécurité électrique et les impératifs de sécurité

a) *Argumentation concernant les prescriptions de sécurité électrique*

91. Une défaillance sur un système à haute tension peut être une cause d'électrisation pour une personne. L'électrisation est possible avec toute source d'électricité qui peut produire un courant électrique d'intensité suffisante traversant la peau, les muscles ou la chevelure. Selon l'intensité, les effets du courant électrique peuvent aller de «désagréable» à «mortel» (http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_shock - cite_note-0).

92. L'intensité minimale de courant électrique perceptible par un être humain est fonction de la nature du courant (alternatif ou continu) et de la fréquence. Le seuil de perception est d'environ 1 mA (rms) de courant alternatif à 60 Hz, ou 5 mA de courant continu. Lorsque l'intensité est suffisamment élevée, elle peut causer des lésions aux tissus ou un état de fibrillation qui aboutit à l'arrêt cardiaque. La fibrillation peut être causée par un courant de 60 mA alternatif (rms, 60 Hz) ou de 300-500 mA continu.

93. L'exposition prolongée à un courant alternatif de 120 V, 60 Hz, est une cause particulièrement dangereuse de fibrillation ventriculaire car, généralement, elle est supérieure au seuil de lâcher, sans que l'énergie reçue soit suffisamment élevée pour projeter la personne loin du conducteur électrique. La gravité potentielle de la décharge dépend des trajets suivis par le courant dans le corps.

94. Lorsque la tension est inférieure à 200 V, la peau humaine est le principal élément contribuant à l'impédance offerte par le corps en cas de macrodécharge au cours de laquelle il y a passage du courant entre 2 points de contact de la peau. Les caractéristiques de la peau cependant ne sont pas linéaires. Si la tension excède 450-600 V, le pouvoir diélectrique de la peau se dégrade. En outre, le degré de protection offert par la peau est diminué par la transpiration, et ce dernier phénomène est accéléré si la décharge électrique cause une contraction des muscles au-delà du seuil de lâcher pendant une période prolongée.

b) *Prescriptions concernant la sécurité en utilisation normale*

95. Par «Prescriptions concernant la sécurité en utilisation normale», on entend les dispositions qui doivent être prises en compte lors de la conception et de la fabrication du véhicule. Ces dispositions doivent être appliquées pour prévenir les risques électriques pour les occupants des véhicules électriques.

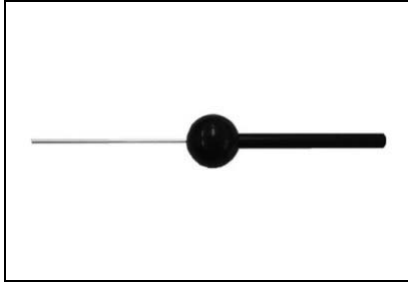
96. Ces prescriptions concernent la chaîne de traction électrique fonctionnant à haute tension, ainsi que les composants et systèmes à haute tension reliés par liaison galvanique.

97. Pour prévenir les risques électriques, il est prescrit que les parties sous tension (c'est-à-dire les parties conductrices dont il est prévu qu'elles sont sous tension en utilisation normale) soient protégées contre un contact direct.

98. La protection contre le contact direct à l'intérieur de l'habitacle doit être vérifiée par un essai avec le fil d'épreuve normalisé (IPXXD).

Figure 5

Fil d'épreuve normalisé



99. À l'extérieur de l'habitacle un doigt d'épreuve normalisé (IPXXB) doit être utilisé pour vérifier si un contact direct avec les parties sous tension est possible ou non.

Figure 6

Doigt d'épreuve normalisé



100. En outre, les parties conductrices exposées (c'est-à-dire les parties qui peuvent être touchées avec le doigt d'épreuve normalisé et qui sont mises sous tension en cas de défaillance de l'isolation) doivent aussi être protégées contre un contact indirect. Cela signifie que des barrières ou capots conducteurs doivent être reliés galvaniquement de manière fiable au châssis électrique.

101. Outre la protection contre les contacts directs et indirects, il est prescrit une valeur de résistance d'isolement pour les systèmes à courant alternatif et à courant continu. La résistance d'isolement mesurée par rapport au châssis électrique est une dimension physique indiquant que l'intensité électrique maximale pouvant traverser le corps humain n'est pas dangereuse.

102. Dans le cas des systèmes à courant continu, qui sont moins dangereux pour l'être humain (voir par. 5.4.1) une résistance de 100 Ω/V est prescrite. Dans le cas des systèmes à courant alternatif, la valeur est de 500 Ω/V . Pour les systèmes à courant continu, un système embarqué de surveillance de la résistance d'isolement est prescrit; il doit avertir le conducteur lorsque la résistance tombe en dessous de 100 Ω/V .

103. Les valeurs prescrites de résistance d'isolement de 100 $\Omega/Volt$ pour le courant continu ou 500 Ω/V pour le courant alternatif sont telles que les intensités maximales traversant le corps sont limitées à 10 mA et 2 mA respectivement.

c) *Prescriptions concernant la sécurité après un choc*

104. Les prescriptions concernant la sécurité après un choc traitent des conditions auxquelles doivent satisfaire les véhicules après le choc. Elles ne décrivent pas la manière dont l'essai de choc doit être exécuté. Cette tâche relève de la responsabilité de chaque Partie contractante. Les prescriptions doivent être respectées pour prévenir les risques électriques pour les occupants du véhicule.

105. Ces prescriptions concernent la chaîne de traction électrique fonctionnant à haute tension, ainsi que les composants et systèmes à haute tension reliés par liaison galvanique.

106. Après l'essai de choc pratiqué sur le véhicule, 3 critères permettent de démontrer que les systèmes sont sûrs. Ils indiquent que le «niveau électrique résiduel» des systèmes à haute tension ne présente pas de danger pour les occupants du véhicule.

a) Absence de haute tension

Après le choc, la tension doit être inférieure ou égale à 30 V (courant alternatif) ou 60 V (courant continu);

b) Résistance d'isolement

La résistance d'isolement, mesurée par rapport au châssis électrique, est une dimension physique indiquant que l'intensité électrique maximale pouvant traverser le corps humain n'est pas dangereuse.

Après le choc, la résistance d'isolement mesurée par rapport au châssis électrique, pour les systèmes à courant alternatif, doit être de 500 Ω/V , et, pour les systèmes à courant continu, de 100 Ω/V .

Les valeurs prescrites de résistance d'isolement de 100 Ω/V pour le courant continu ou 500 Ω/V pour le courant alternatif sont telles que les intensités maximales traversant le corps sont limitées à 10 mA et 2 mA respectivement.

c) Protection physique

Après le choc il ne doit pas être possible de toucher des parties sous tension, lors d'un essai exécuté avec le doigt d'épreuve normalisé. En outre, il doit être satisfait aux conditions de protection contre le contact indirect.

Par décision des Parties contractantes à l'Accord de 1998, une quatrième mesure est autorisée.

d) Faible niveau d'énergie

Après le choc, le niveau d'énergie du système doit être inférieur à 2,0 j.

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

107. Les procédures d'essai du paragraphe 6 reproduisent les conditions d'utilisation routière aux fins de l'application des prescriptions fonctionnelles énoncées au paragraphe 5. La plupart des procédures d'essai sont inspirées des procédures d'essai définies dans les règlements nationaux antérieurs et/ou dans les normes de l'industrie.

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: Procédure d'essai pour déterminer les fuites après choc, procédure s'appliquant aux systèmes de stockage d'hydrogène comprimé

108. Pour l'essai d'étanchéité après choc, 2 cas sont possibles:

6.1.1.1 Procédure d'essai dans le cas où le gaz d'essai est l'hydrogène

6.1.1.2 Procédure d'essai dans le cas où le gaz d'essai est l'hélium.

109. La perte de carburant représente la quantité libérée autorisée pour l'ensemble du système de stockage de l'hydrogène comprimé sur le véhicule. La quantité libérée après un choc peut être déterminée par mesure de la perte de pression dans le système de stockage de gaz comprimé au cours d'une période d'une durée d'au moins 60 min après le choc, puis par calcul du taux de fuite de l'hydrogène sur la base de la perte de pression mesurée et de la durée au moyen 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 de réservoirs multiples de stockage d'hydrogène qui sont isolés l'un de l'autre après un choc, il peut être nécessaire de mesurer la perte d'hydrogène individuellement (selon l'approche décrite au paragraphe 5.2.2.1) puis de totaliser les valeurs individuelles pour déterminer la fuite totale d'hydrogène gazeux du système de stockage.

110. Cette méthodologie peut aussi être élargie pour permettre l'utilisation d'un gaz non inflammable pour l'essai de choc. L'hélium a été choisi comme gaz de substitution parce que, comme l'hydrogène, il a un faible poids moléculaire. Afin de déterminer le rapport des débits volumiques entre les pertes d'hydrogène et d'hélium, on part de l'hypothèse que les fuites s'échappant du système de stockage de l'hydrogène comprimé peuvent être décrites comme un écoulement étranglé par un orifice, où la section A de l'orifice représente la section de fuite totale équivalente pour le système de stockage en conditions postérieures au choc. Dans ce cas l'équation pour le débit massique est donnée par la formule:

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

où

C_d est le coefficient de décharge de l'orifice, A la section de l'orifice et P la densité et la pression du fluide en amont (à l'état stagnant) et où les lettres ρ et C sont données par les formules:

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

et

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

où

R_u est la constante universelle des gaz, et T, M, et γ sont la température, le poids moléculaire et le rapport des chaleurs spécifiques (C_v/C_p) pour le gaz en cause dans la fuite. Étant donné que les facteurs C_d , A, R_u , T, et P sont tous constants aux fins de la détermination de la relation entre le taux de fuite d'hélium et d'hydrogène après le choc, l'équation suivante définit le rapport de débit sur base massique.

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

111. Étant donné que nous pouvons déterminer le rapport des débits volumiques en multipliant le rapport des débits massiques par le rapport des poids moléculaires M à conditions de température et de pression constantes, on a:

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

112. Sur la base de la relation ci-dessus, il est possible de déterminer que le rapport des débits volumiques (et par conséquent le rapport des concentrations de gaz en volume), entre l'hélium utilisé comme gaz d'essai et l'hydrogène est d'environ 75 % pour des sections de fuite identiques à partir du système de stockage. Les fuites d'hydrogène après choc peuvent donc être déterminées par la formule:

$$V_{H_2} = V_{He} / 0,75$$

où V_{He} est le taux 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 après l'essai de choc dans les espaces fermés pour les véhicules à système de stockage de l'hydrogène comprimé*

113. On peut effectuer l'essai en mesurant la teneur en hydrogène ou en mesurant la baisse correspondante de la teneur 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 exécuté en parallèle avec l'essai de fuite après un choc du système de stockage, et s'étendra donc sur une durée d'au moins 60 min, il n'est pas nécessaire de prévoir une marge pour la prise en compte des zones de dilution car il existe un délai suffisant pour que l'hydrogène puisse se diffuser dans tout le compartiment.

114. Au cas où l'essai de choc n'est pas exécuté avec de l'hydrogène et où l'essai de fuite est effectué avec l'hélium comprimé, il est nécessaire de définir un critère pour la concentration d'hélium qui soit équivalent à 4 % d'hydrogène en volume. Compte tenu du fait que la concentration d'hydrogène et d'hélium dans le compartiment (en volume) est proportionnelle au débit volumique des fuites respectives, il est possible de déterminer la concentration admissible d'hélium en volume, X_{He} , au moyen de l'équation présentée dans les paragraphes 108 à 112 du préambule en multipliant le critère de concentration d'hydrogène par 0,75. Le critère de concentration d'hydrogène est donc conforme à la formule:

$$X_{He} = 4 \% H_2 \text{ en volume} \times 0,75 = 3 \% \text{ en volume.}$$

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

115. Un exemple d'emplacements de mesure des concentrations d'hydrogène est donné dans le document «Examples of hydrogen concentration measurement points for testing» (Rapport de l'OICA au groupe SGS-3 sur la base du document Japanese Regulation Attachment 100).

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

116. La plupart des procédures d'essai pour les systèmes de stockage d'hydrogène sont tirées des procédures d'essai formulées dans les règlements nationaux antérieurs et/ou les normes de l'industrie. Les différences importantes sont l'exécution des essais en séquence (par opposition aux essais qui étaient exécutés en parallèle par le passé, chacun sur un réservoir nouveau), et la réduction de la vitesse de remplissage lors de l'essai d'éclatement

pour tenir compte des vitesses de remplissage en utilisation réelle. En outre, les temps de maintien de la pression aux points d'essai de la pression d'éclatement ont été prolongés jusqu'à 4 min. Ces modifications visent à réduire la dépendance des mesures de la pression d'éclatement initiale par rapport à la vitesse de remplissage et d'évaluer l'aptitude à supporter la pression. Une évaluation pour déterminer dans quelle mesure les prescriptions du présent projet de RTM sont suffisamment développées et rigoureuses par rapport aux prescriptions des règlements antérieurs de l'Union européenne est présentée dans le rapport Transport Research Laboratory Project Report RPN1742 «Hydrogen-Powered Vehicles: A Comparison of the European Legislation and the draft UNECE global technical regulation» (C. Visvikis).

117. Des prescriptions pour les dispositifs de fermeture du système de stockage d'hydrogène (dispositif de décompression thermocommandé (TPRD), vanne d'arrêt automatique et soupape antiretour) ont été élaborées par les sous-groupes HGV3.1 et TPRD-1 du CSA:

- a) Évaluation de la durabilité vis-à-vis des cycles de pression (50 000 cycles) (par. 6.2.6.2.3) qui reproduisent les ondes de pression multiples subies par les soupapes antiretour au cours du remplissage et les actionnements multiples des vannes d'arrêt automatiques entre remplissages;
- b) Des essais de vibrations (par. 6.2.6.2.8) ont été établis pour balayer les fréquences comprises entre 10 et 40 Hz, car plusieurs laboratoires d'essai des composants avaient signalé qu'il pouvait y avoir plus d'une fréquence de résonance. La fréquence de 17 Hz qui est utilisée traditionnellement dans les essais de vibrations des composants a été déterminée par des essais sur un véhicule circulant sur différents revêtements routiers, et tient compte de l'influence du moteur situé à proximité. Il est concevable cependant que la fréquence de résonance puisse changer en fonction de la conception du dispositif et des dispositions de montage, en conséquence, afin de garantir la prise en compte des conditions les plus rigoureuses, un balayage jusqu'à 40 Hz est prescrit;
- c) Les prescriptions concernant la sensibilité à la température ($T_{life} = 9,1 \times T_{act}^{0,503}$), telles qu'elles sont énoncées dans les méthodes d'essai accéléré de durée de vie (para. 6.2.6.1.2) sont basées sur le rapport de D. Stephens (Battelle Memorial Institute) intitulé «Rationale for Long-Term Test Temperature for Thermally Activated PRDs»;
- d) Les résultats des essais des dispositifs de fermeture sont enregistrés par le laboratoire d'essai et communiqués au fabricant. Dans l'essai de débit, le débit retenu est celui des 8 dispositifs de décompression qui a donné le débit le plus bas, en Nl par minute (0 °C et 1 atmosphère), corrigé pour l'hydrogène;
- e) L'essai d'exposition aux agents atmosphériques (par. 6.2.6.2.6) s'inspire de 2 autres essais, à savoir l'essai de résistance à l'oxygène et l'essai de résistance à l'ozone. Le premier est prévu dans la norme CSA NGV3.1, qui est elle-même harmonisée avec les normes ISO CD 12619, deuxième partie (composants pour l'hydrogène) et ISO 15500, deuxième partie (composants pour le GNC), alors que le second est prévu dans le Règlement n° 110 pour les composants pour le GNC; ce dernier est aussi utilisé pour les composants hydrogène et GNC dans les normes CSA.

G. Argumentation concernant les prescriptions facultatives: Véhicules à système de stockage de l'hydrogène liquéfié

118. Compte tenu du fait que les véhicules à hydrogène en sont encore à un stade précoce de mise au point et de commercialisation, les essais et l'évaluation concernant les méthodes d'essai pour la qualification des véhicules pour l'utilisation routière sont en cours depuis plusieurs années. Les systèmes de stockage d'hydrogène liquéfié cependant (LHSS) ont fait l'objet d'une proportion bien moindre de travaux d'évaluation que les systèmes de stockage de gaz comprimé. À l'heure où ce document est établi, un seul véhicule à stockage d'hydrogène liquéfié a été proposé par un seul fabricant, et l'expérience de l'utilisation routière de ces véhicules avec ces systèmes de stockage est très limitée. Les prescriptions proposées concernant ces systèmes dans le présent document ont été discutées sur une base théorique et, bien qu'elles soient en apparence raisonnables, elles n'ont pas été validées. Compte tenu de cette expérience limitée, certaines Parties contractantes ont demandé que l'on prévoie plus de temps pour les essais et la validation. En conséquence, les prescriptions s'appliquant aux systèmes de stockage de l'hydrogène liquéfié ont été présentées dans la section G en tant que prescriptions facultatives.

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

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

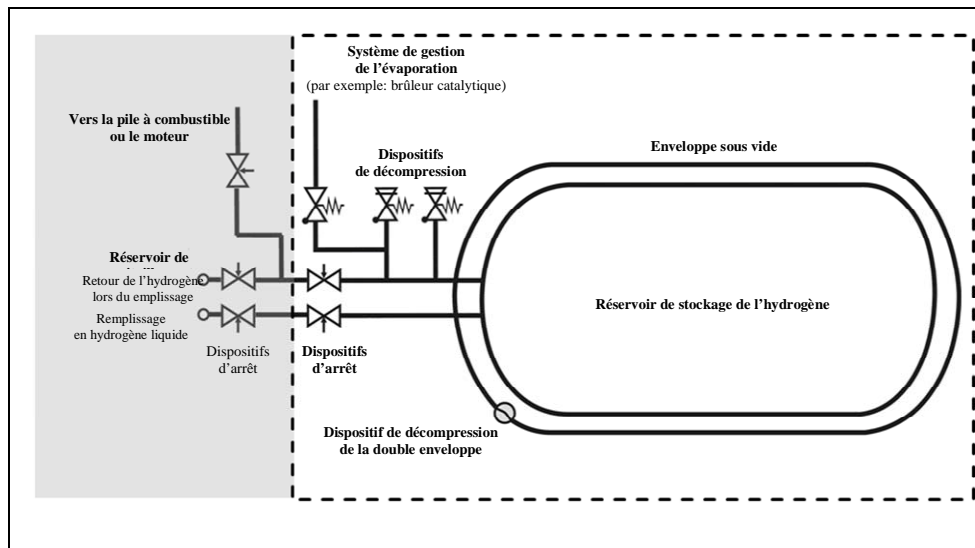
119. Pour remédier à cet inconvénient, les systèmes de stockage de l'hydrogène liquéfié (LHSS) maintiennent l'hydrogène à l'état liquéfié aux températures cryogéniques.

b) Un système typique de stockage de l'hydrogène liquéfié (LHSS) est représenté à la figure 7

120. Il est probable que les systèmes en utilisation réelle différeront du point de vue du type, du nombre, de la configuration et de l'agencement des différents éléments fonctionnels. En dernier ressort, les limites du système à hydrogène liquéfié sont définies par les interfaces assurant l'isolement de l'hydrogène stocké liquéfié (et/ou gazeux) par rapport au reste du système d'alimentation et à l'environnement. 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 par exemple le système typique illustré à la figure 7 se compose des éléments réglementés suivants:

- a) Réservoir(s) de stockage de l'hydrogène liquéfié;
- b) Dispositif(s) d'arrêt;
- c) Système de gestion de l'évaporation;
- d) Dispositifs de décompression (PRD);
- e) Tuyauteries de raccordement (si elles existent) et raccords entre les composants ci-dessus.

Figure 7
Système typique de stockage de l'hydrogène liquéfié



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

121. L'hydrogène gazeux du système de stockage retourne vers la station de distribution au cours du processus de remplissage de manière que l'hydrogène liquéfié puisse remplir le réservoir de stockage sans causer de surpressurisation du système. Deux vannes d'arrêt sont prévues aussi bien sur le tuyau de remplissage en hydrogène liquéfié que sur le tuyau de retour de l'hydrogène gazeux pour éviter des fuites en cas de défaillance simple.

d) L'hydrogène liquéfié est stocké en condition cryogénique

122. Afin de maintenir l'hydrogène à l'état liquide, le réservoir doit être bien isolé, y compris par l'utilisation d'une enveloppe sous vide entourant le réservoir de stockage. 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 sous vide.

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

123. Un système de gestion de l'évaporation limite l'élévation de pression induite par le transfert de chaleur dans le ou les réservoirs de stockage de l'hydrogène à une valeur de pression spécifiée par le fabricant. L'hydrogène qui est évacué du système de stockage peut être soumis à un traitement avant évacuation vers l'extérieur ou consommé dans les systèmes en aval. Les quantités relâchées vers l'extérieur à la suite d'une évacuation de gaz en cas de surpression devraient être considérées comme faisant partie de la fraction autorisée de fuite ou de perméation de l'ensemble du véhicule.

f) Défaut de fonctionnement

124. En cas de défaut de fonctionnement du système de gestion de l'évaporation, de défaillance de l'isolation par vide, ou d'incendie extérieur, le ou les réservoirs de stockage de l'hydrogène sont protégés contre la surpression par 2 dispositifs de décompression indépendants (PRD) et l'enveloppe sous vide est protégée par un dispositif de décompression de l'enveloppe sous vide.

g) Lorsque l'hydrogène est envoyé du réservoir vers le système de propulsion, il s'écoule depuis le système de stockage en passant par la vanne d'arrêt raccordée au système d'alimentation un carburant

125. Dans le cas où un défaut est détecté dans le système de propulsion 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 de l'hydrogène liquéfié du paragraphe 7.2

126. L'efficacité du confinement de l'hydrogène à l'intérieur du système de stockage de l'hydrogène liquéfié est essentielle pour empêcher les fuites d'hydrogène vers l'environnement et vers les systèmes situés en aval. Les essais fonctionnels au niveau du système du paragraphe 7.2 ont pour objet de démontrer que le système présente un niveau de sécurité suffisant quant à une rupture du réservoir et à la capacité d'assurer les fonctions critiques pendant toute la durée de service, y compris les cycles de pression auxquels il est soumis au cours de l'utilisation routière, la limitation de la pression en cas de conditions extrêmes et de défectuosité et en cas d'incendie.

127. Des prescriptions d'essai fonctionnelles pour tous les systèmes de stockage de l'hydrogène liquéfié pour l'utilisation du véhicule en circulation routière sont énoncées au paragraphe 7.2. Ces critères s'appliquent à la qualification des systèmes de stockage destinés à être utilisés pour la production de véhicules neufs.

128. Dans la présente section, on 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 relatifs aux caractéristiques mesurées de référence pour les systèmes de stockage d'hydrogène liquéfié

129. Il est prévu un essai de pression d'épreuve et un essai d'éclatement initial de référence pour démontrer l'aptitude structurale de la partie intérieure du réservoir.

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

130. Compte tenu de la conception du réservoir et des spécifications concernant les limites de pression au cours de l'exploitation normale et en conditions dégradées (comme prescrit dans les paragraphes 7.4.2.2 et 7.4.2.3), la pression dans le réservoir intérieur pourrait s'élever jusqu'à 110 % de la pression de service maximale admissible (PSMA) en conditions dégradées causant l'intervention du dispositif de décompression primaire, et au maximum à 150 % de la PSMA en conditions dégradées du «cas le plus défavorable» c'est-à-dire lorsqu'il y a eu défaillance du dispositif de décompression primaire et que le dispositif de décompression secondaire doit intervenir et protéger le système. L'objet de l'essai de pression d'épreuve à 130 % de la PSMA est de démontrer que le réservoir intérieur demeure en dessous de sa limite d'élasticité à cette pression.

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

131. Par conception (et comme démontré au paragraphe 5.2.3.3), la pression peut s'élever jusqu'à 150 % de la PSMA lorsque le(s) dispositif(s) de décompression secondaire (de secours) doit (doivent) s'actionner. L'essai de pression d'éclatement vise à démontrer qu'il subsiste une marge de sécurité avant l'éclatement du réservoir dans ces conditions du «cas le plus défavorable». Les niveaux de pression d'essai correspondant soit à la PSMA (en MPa) plus 0,1 MPa, multiplié par 3,25, ou PSMA (en MPa) plus 0,1 MPa, multiplié par 1,5 et multiplié par R_m/R_p (où R_m est la résistance maximale à la traction et R_p la limite minimale d'élasticité du matériau du réservoir) sont des valeurs couramment appliquées pour établir une telle marge pour les chemises métalliques.

132. En outre, des valeurs élevées obtenues lors de l'essai d'éclatement (en combinaison avec un choix approprié des matériaux) démontrent que les niveaux de contrainte sont raisonnablement bas, de telle manière que les problèmes de fatigue causée par les cycles sont peu susceptibles d'apparaître pour des réservoirs métalliques établis sur la base de calculs de conception tenant compte de ces facteurs. Dans le cas des réservoirs non métalliques, un essai supplémentaire est prescrit au paragraphe 7.4.1.2 pour démontrer que cette aptitude existe, étant donné que les procédures de calcul n'ont pas encore été normalisées pour ces matériaux.

b) Argumentation concernant la vérification des caractéristiques prévues en utilisation routière: paragraphe 7.2.2

i) *Argumentation concernant les prescriptions relatives à la gestion de l'évaporation: paragraphes 7.2.2.1 et 7.4.2.1*

133. En utilisation normale, le système de gestion de l'évaporation doit limiter la pression à une valeur inférieure à la PSMA. Les conditions les plus critiques, pour le système de gestion de l'évaporation, sont atteintes lors d'une période de stationnement après un remplissage au niveau maximal de remplissage dans un système de stockage de l'hydrogène liquéfié, avec une période limitée de refroidissement de 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*

134. L'essai de fuite d'hydrogène doit être exécuté pendant la phase de gestion de l'évaporation du système de stockage de l'hydrogène liquéfié. Les fabricants optent en général pour traiter la totalité (ou la majeure partie) de l'hydrogène qui s'échappe du réservoir, mais afin d'établir un critère de fuite d'hydrogène comparable avec les valeurs appliquées au système de stockage de l'hydrogène comprimé, le laboratoire d'essai devrait compter tout l'hydrogène qui s'échappe des systèmes de gestion de l'ébullition du véhicule avec les autres fuites éventuelles de manière à déterminer les fuites totales d'hydrogène des véhicules.

135. Une fois cette correction effectuée, la fuite admissible d'hydrogène d'un véhicule à système de stockage d'hydrogène liquéfié est la même que pour un véhicule à stockage d'hydrogène comprimé. Conformément aux points discutés aux paragraphes 62 et 63 de la section E1 c) du préambule, les fuites totales d'un véhicule à hydrogène liquéfié peuvent donc être de 150 ml/min pour une dimension de garage de 30,4 m³. Comme pour les gaz comprimés, le facteur d'échelle $[(V_{largeur} + 1) * (V_{hauteur} + 0,05) * (V_{longueur} + 1) / 30,4]$, peut être appliqué pour tenir compte des variantes de combinaison garage/véhicule par rapport à celles utilisées pour le calcul des taux, et tenir compte également des petits véhicules qui pourraient être stationnés dans de petits garages.

136. Avant l'exécution de cet essai, le fonctionnement du dispositif de décompression primaire devrait être provoqué de manière à confirmer l'aptitude de ce dispositif à se refermer et à satisfaire aux prescriptions concernant le taux de fuite.

iii) *Argumentation concernant la prescription relative à la perte de vide: paragraphes 7.2.2.3 et procédure d'essai du paragraphe 7.4.2.3*

137. Afin de démontrer le bon fonctionnement des dispositifs de décompression et le respect des limites de pression admises du système de stockage de l'hydrogène liquéfié comme décrit à la section G2 b) du préambule et vérifié selon le paragraphe 7.2.2.3, une perte de vide soudaine due à une entrée d'air dans l'enveloppe sous vide est considérée comme une condition de défaillance du «cas le plus défavorable». Contrairement à une entrée d'hydrogène dans l'enveloppe sous vide, une entrée d'air cause un apport nettement plus élevé de chaleur au réservoir intérieur par suite de la condensation de l'air sur les surfaces froides et l'évaporation de l'air sur les surfaces chaudes à l'intérieur de l'enveloppe sous vide.

138. Le dispositif de décompression primaire doit être constitué par une soupape de décompression du type à fermeture automatique, de telle manière que l'évacuation d'hydrogène cesse lorsque l'effet de la défaillance s'atténue. Ces soupapes, conformément à des normes de conception reconnues au niveau mondial, peuvent présenter une marge de tolérance de 10 % d'accroissement de la pression entre le point de consigne et l'actionnement complet, une fois incluses les tolérances admissibles sur le point de consigne lui-même. Étant donné que la soupape de décompression devrait être réglée à la PSMA ou en dessous, la pression lors de la simulation du défaut qui doit causer l'intervention du dispositif de décompression primaire ne devrait pas dépasser 110 % de la PSMA.

139. Les dispositifs de décompression secondaires ne devraient pas s'actionner lors de la simulation d'une perte de vide devant causer l'intervention du dispositif de décompression primaire, car leur fonctionnement pourrait causer une instabilité nuisible du système et une usure inutile de ces dispositifs secondaires. Pour démontrer le fonctionnement intrinsèquement sûr des dispositifs de décompression et le fonctionnement du dispositif de décompression secondaire conformément 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, les dispositifs utilisés peuvent être soit des soupapes de surpression, soit des disques de rupture, et il est admis que la pression s'élève jusqu'à 136 % de la PSMA (dans le cas d'une soupape utilisée comme dispositif de décompression secondaire) ou jusqu'à 150 % de la PSMA (dans le cas d'un disque de rupture utilisé comme dispositif de décompression secondaire) au cours de la simulation d'un défaut par perte de vide.

c) **Argumentation concernant le paragraphe 7.2.3: Essai de vérification pour les conditions de retrait du service**

140. Outre les effets qu'il peut avoir en causant une diminution du vide ou une perte totale de vide, 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 la vérification des composants hydrogène liquéfié:
Dispositifs de décompression et vanne d'arrêt: paragraphe 7.2.4**

i) Argumentation concernant les prescriptions de qualification des dispositifs de décompression pour l'hydrogène liquéfié (par. 7.2.4.1)

141. 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 la durée de service alors que le dispositif a été exposé à des cycles de remplissage/vidage et à des variations de température et aux facteurs environnementaux. La valeur suffisante du débit pour une application donnée est vérifiée sur la base de l'essai du brasier sur le système de stockage de l'hydrogène et des prescriptions d'essai concernant la perte de vide (par. 7.2.3 et 7.4.3).

ii) Argumentation concernant les prescriptions de qualification de la vanne d'arrêt pour l'hydrogène liquéfié: paragraphe 7.2.4.2

142. Ces prescriptions ne visent pas à faire entrave à la conception et à la fabrication de composants (composants ayant des fonctions multiples par exemple) qui ne sont pas expressément prescrits dans le présent Règlement, pour autant que ces variantes aient été prises en considération lors de l'essai des composants. Lors de l'étude de variantes de conception de fabrication, les matériaux et la méthode appliquée doivent être évalués par le laboratoire d'essai pour garantir l'obtention de caractéristiques équivalentes et l'application de concepts de sécurité raisonnables par rapport à ceux prescrits dans le présent Règlement. Dans ce cas, le nombre d'échantillons et l'ordre des essais applicables doivent être fixés par accord entre le constructeur et le laboratoire d'essai. Sauf autre prescription, tous les essais doivent être exécutés avec un gaz sous pression tel que l'air ou l'azote contenant au moins 10 % d'hélium (voir Règlement CE 406/2010 p. 52 4.1.1). Le nombre total de cycles de fonctionnement doit être de 20 000 (cycles de fonctionnement pour les vannes d'arrêt automatiques).

143. Le système d'arrêt du débit d'une vanne d'arrêt automatique montée sur un réservoir de stockage d'hydrogène liquéfié doit être à sécurité intrinsèque. Le terme «sécurité intrinsèque» signifie que le dispositif doit être capable de revenir automatiquement sur un mode sûr ou garantir une coupure complète et fiable pour tous les modes de défaillance plausibles.

144. Les essais électriques de la vanne d'arrêt automatique montée sur des réservoirs de stockage d'hydrogène liquéfié doivent apporter la garantie d'un fonctionnement correct: dans les cas i) de surchauffe causée par une surtension, et ii) de défaillance potentielle de l'isolation entre le conducteur d'alimentation du composant et le boîtier du composant.

3. Argumentation concernant les prescriptions d'une qualification de conception du système d'alimentation en carburant du véhicule pour l'hydrogène liquéfié (LH2)

145. Cette section énonce les prescriptions concernant l'intégrité du système d'alimentation en hydrogène, ce qui inclut le système de stockage de l'hydrogène liquéfié, les tuyauteries, raccords et composants dans lesquels l'hydrogène est présent. Ces prescriptions s'ajoutent aux prescriptions énoncées au paragraphe 5.2; toutes s'appliquent aux véhicules à système de stockage de l'hydrogène liquéfié, à l'exception du paragraphe 2.1.1. L'étiquette du réservoir de ravitaillement 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 à hydrogène liquéfié

146. L'argumentation concernant les procédures d'essai est incluse dans l'argumentation concernant les prescriptions fonctionnelles aux sections G2 a) et G2 b) du préambule.

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

147. Comme pour les véhicules à système de stockage d'hydrogène comprimé, il est possible de procéder à la mesure directe de l'hydrogène ou à la mesure par diminution correspondante de la concentration d'oxygène.

148. Si de l'azote liquéfié est utilisé comme gaz pour les essais 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 de fuite d'hélium qui est exécuté après le choc. Il est possible de définir un critère de concentration d'hélium qui équivaut à une concentration d'hydrogène de 4 % en volume, mais la relation doit être corrigée en fonction de la différence de température du gaz entre la température de fonctionnement du système de stockage de l'hydrogène liquéfié et la température au cours de l'essai de fuite d'hélium, outre la prise en compte des différences de propriétés physiques. L'hydrogène liquéfié est stocké (et s'échappera par les fuites) aux températures de stockage cryogéniques (-253 °C ou 20 K), mais le système est pratiquement à la température ambiante (20 °C ou 293 K) pour l'essai de fuite. Dans ce cas, les équations indiquées à la section F1 a) peuvent être appliquées pour exprimer le rapport des débits massiques d'hélium et d'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 rapport des débits volumétriques d'hélium et d'hydrogène, comme suit:

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

où les termes sont comme définis en A.5.2.1.1. L'application des débits volumiques comme défini ci-dessus pour prendre en compte un système qui fonctionne aux conditions de stockage cryogénique, mais qui est soumis à un essai de fuite à la température ambiante pour vérifier qu'il n'existe pas de concentration supérieure à 4 % d'hydrogène en volume dans le véhicule à l'essai, donne une valeur d'environ 0,8 % d'hélium en volume comme valeur admissible pour l'essai de fuite des systèmes à hydrogène liquéfié après le choc.

a) Argumentation concernant le paragraphe 7.5.1: Essai de fuite après le choc – systèmes de stockage de l'hydrogène liquéfié (LHSS)

149. L'objet de l'essai est de confirmer que la fuite de gaz d'un véhicule à système à hydrogène liquéfié après l'essai de choc ne dépasse pas les valeurs prescrites. Pour l'essai de choc, le système est rempli soit d'hydrogène liquéfié (LH2) à la quantité maximale, soit d'azote liquéfié (LN2) jusqu'à une valeur équivalente au taux maximal de remplissage en hydrogène en poids (ce qui correspond environ à 8 % du volume maximal d'hydrogène liquéfié dans le système) selon le gaz liquide qu'il est prévu d'utiliser pour l'essai de choc. Le taux de remplissage en LN2 d'environ 8 % est nécessaire pour simuler le poids du carburant pour l'essai de choc, et une légère quantité supplémentaire d'hydrogène liquéfié est ajoutée pour tenir compte du refroidissement du système et des pertes par évacuation avant l'essai. Une détection visuelle des fuites inacceptables après le choc, comme défini au paragraphe 7.5.1.1, peut être faisable en pratique s'il est possible d'inspecter visuellement le système à hydrogène liquéfié après le choc. Si on utilise un liquide d'essai d'étanchéité standard, la dimension des bulles devrait être d'environ 1,5 mm de diamètre. Pour un débit

localisé de 0,005 mg/s (216 Nml/h), le taux résultant admissible de formation de bulles est d'environ 2 030 bulles par min. Même si les bulles formées sont de taille beaucoup plus grande, la fuite devrait être facilement détectable. Par exemple le taux de formation de bulles pour des bulles de 6 mm serait d'environ 32 bulles par min, 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.

150. Si l'essai de contrôle par bulles n'est pas applicable ou jugé souhaitable, un essai d'étanchéité global peut être effectué, pour obtenir des résultats plus objectifs. Dans ce cas, le critère de fuite est le même que celui fixé pour les véhicules à système de stockage de l'hydrogène comprimé. Plus précisément, le taux de fuite admissible d'hydrogène à partir du système de stockage est de 118 NI/min ou 10,7 g/min. Le gaz qui s'échappe pourra être à l'état gazeux, liquide ou dans un état correspondant à un mélange des 2 phases. Il est probable que les fuites seront à l'état gazeux, étant donné que les tuyauteries des 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 le choc prescrits dans le présent document permettent de détecter de très petites traces de 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 d'un mélange de 2 phases, car le débit sera alors moindre que ce qu'il peut atteindre à l'état liquide.

151. L'essai d'étanchéité après le choc visé au paragraphe 7.5.1.2.1 est effectué avec de l'hélium sous pression. L'exécution de cet essai permet non seulement de confirmer que le taux de fuite du système de stockage est acceptable, mais aussi d'effectuer l'essai de mesure de la concentration d'hélium après le choc, tel qu'il est décrit aux paragraphes 113 à 115 de la section F1 b) du préambule, simultanément. L'essai de fuite d'hélium est effectué à température ambiante, avec le système de stockage mis sous pression avec de l'hélium à la pression normale de fonctionnement. Le niveau de pression devrait être inférieur à la pression d'actionnement 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.

La fuite d'hydrogène à l'état liquide d'un système en conditions de fonctionnement est donnée 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 décharge, A la section de l'orifice de sortie, ρ la densité et ΔP_1 la différence de pression entre le système en conditions de fonctionnement et l'atmosphère. Cette équation est applicable aux fluides incompressibles tels que fluides à l'état liquide. L'application de cette équation correspond à une évaluation très prudente. Dans ce cas, en effet, étant donné qu'une portion du fluide est souvent gazéifiée instantanément (c'est-à-dire qu'elle passe à l'état gazeux) lorsque le fluide sort de l'orifice de fuite, ce qui cause une réduction de la densité et donc une réduction du débit massique.

La fuite d'hélium gazeux au cours de l'essai de fuite est donnée par la formule:

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

où

C_d et A sont définis ci-dessus, ρ et P sont la densité du fluide et la pression en amont (à l'état stagnant) 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 rapport des chaleurs spécifiques pour le gaz hélium qui s'échappe.

Étant donné que C_d et A sont des constantes qui ont les mêmes valeurs à la fois pour l'hydrogène liquéfié s'échappant du réservoir en utilisation réelle et l'hélium gazeux s'échappant lors de l'essai d'étanchéité, le rapport de la fuite d'hélium à la fuite d'hydrogène liquéfié peut être calculé par la formule:

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

L'équation A.7.5.1-4, basée sur la combinaison des équations A.7.5.1-1 et A.7.5.1-2, peut être appliquée pour calculer le débit massique d'hélium au début de l'essai de pression, mais dans ce cas la pression baissera au cours de l'essai de pression, alors que sur un réservoir à hydrogène liquéfié en conditions de fonctionnement, elle demeurera pratiquement constante jusqu'à ce que tout le liquide ait été évacué.

152. Pour pouvoir déterminer avec précision la baisse admissible de pression au cours de l'essai d'étanchéité, la variation du débit d'hélium avec la pression doit être prise en compte. 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 variera aussi de manière linéaire avec la pression selon la formule:

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

où

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

Si on part de l'équation du gaz idéal,

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

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 du gaz hélium sur une base massique, 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 à hydrogène liquéfié ($\partial M_t / \partial t$) est égale au débit massique d'hélium au cours de la période d'essai (W_t), on peut remplacer W_t par l'équation 5 dans l'équation 7. Après réagencement des termes, l'équation devient:

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

où

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

L'intégration de l'équation différentielle ci-dessus donne des expressions pour la pression admissible à la fin de l'essai d'étanchéité avec l'hélium et la perte de pression admissible correspondante au cours de la période d'essai. Ces expressions sont:

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

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.

153. Un exemple de l'application des équations ci-dessus peut être donné ici: prenons le cas d'un véhicule de tourisme typique ayant un réservoir d'hydrogène liquéfié de 100 l de volume. Par principe, on attribue aux paramètres de sécurité fondamentaux les mêmes valeurs que pour un système de stockage d'hydrogène comprimé. Plus précisément, la durée de l'essai d'étanchéité est fixée à 60 min et le taux moyen de fuite de H₂ doit être équivalent à 10,7 g/min. L'application de ces paramètres dans le cas de l'exemple ci-dessus donne les valeurs suivantes:

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

Taux de fuite admissible de H₂ liquide (W_1) = 10,7 g/min = 118 NI/min de gaz après évaporation instantanée

PSMA = 6 atm (pr. manométrique) = 7 atm (pr. absolue)

Pression d'hélium choisie pour l'essai (P_{He}), inférieure aux points de consigne du détendeur = 5,8 atm (pr. absolue)

Rapport de chaleur spécifique (k) pour l'hélium = 1,66

C pour l'hélium = 0,725, tiré de 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 d'hydrogène liquéfié (ΔP_1) = 5,8 atm - 1 atm = 4,8 atm

Rapport massique de la fuite d'hélium à la fuite d'hydrogène liquéfié (W_{He}/W_1) = 0,0654

Taux 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)

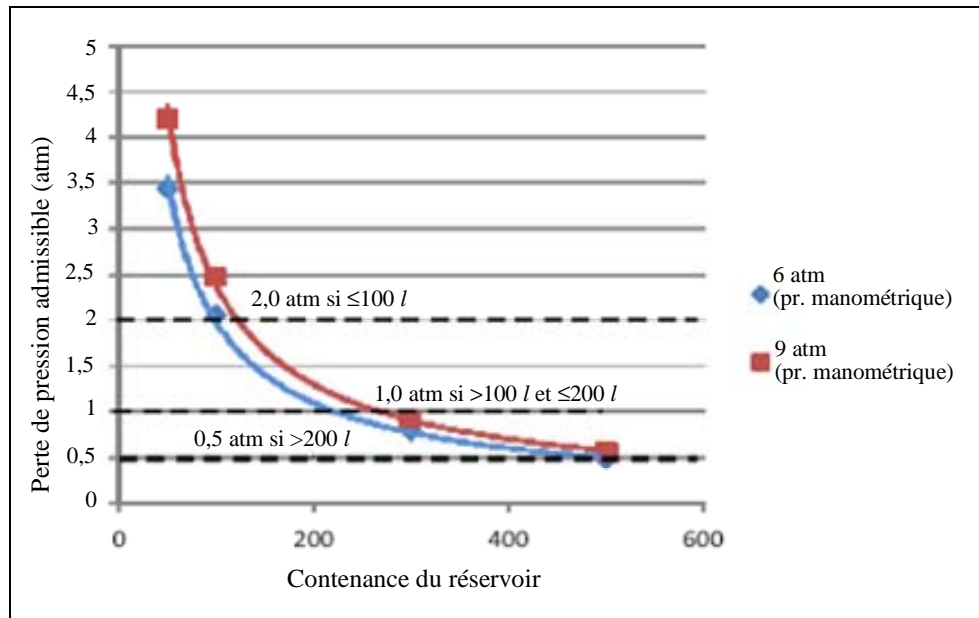
Perte de pression admissible de l'hélium ($\Delta P_{\text{allowable}}$) = 2,06 atm (selon l'équation A.7.5.1-10).

154. L'exemple ci-dessus démontre comment les équations peuvent être utilisées pour déterminer la perte de pression de l'hélium au cours de la période d'essai de 60 min pour l'essai d'étanchéité. Les calculs ont été répétés sur la plage probable de volume du réservoir (de 50 l à 500 l) et la pression nominale typique du réservoir (de 6 atm à 9 atm de pression manométrique) pour pouvoir mieux comprendre dans quelle mesure la perte de pression admissible était dépendante des paramètres clefs (voir fig. 8). Étant donné que les valeurs de la perte de pression admissible sont supérieures à 0,5 atm (le plus souvent même assez largement) pour toutes les dimensions probables de réservoir, il a été décidé d'appliquer un

critère simple de 0,5 atm pour tous les réservoirs d'une contenance de stockage supérieure à 200 l, afin de simplifier l'exécution de l'essai d'étanchéité et la fixation de critères de résultats satisfaisants pour l'essai. Pour les mêmes raisons, un critère de 2 atm a été adopté pour les réservoirs d'une contenance inférieure ou égale à 100 l, et un critère de 1 atm pour les réservoirs d'une contenance supérieure à 100 l et inférieure ou égale à 200 l.

Figure 8

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



155. Alors que cette méthodologie permet d'appliquer une méthode d'essai simple donnant des résultats objectifs sur la base d'un type d'essai couramment utilisé, il convient de noter que le critère de résultats est peut-être excessivement prudent dans la mesure où la méthodologie repose sur l'hypothèse d'une fuite de liquide et non pas d'une fuite gazeuse plus probable à partir des tuyauteries et vannes situées en aval du réservoir à hydrogène liquéfié. Ainsi, par exemple, le rapport de fuite d'hydrogène peut être déterminé avec l'équation A.7.5.1-2 et le rapport résultant de la fuite d'hélium gazeux admissible à la fuite d'hydrogène gazeux est d'un facteur 5,14 fois supérieur à celui calculé sur la base de la fuite d'hydrogène liquéfié.

H. Prescriptions nationales concernant la compatibilité des matériaux (y compris les effets de fragilisation par hydrogène) et de conformité de production

1. Compatibilité des matériaux et fragilisation par l'hydrogène

156. Le sous-groupe SGS a reconnu l'importance des prescriptions concernant la compatibilité des matériaux et les effets de 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 dans tous les cas des matériaux qui sont qualifiés de manière appropriée pour l'utilisation pour le stockage d'hydrogène et qui répondent aux exigences de conception des fabricants. Cependant, par suite 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

groupe de travail SGS a recommandé que les Parties contractantes continuent d'appliquer leurs prescriptions nationales en ce qui concerne la compatibilité des matériaux et l'effet de fragilisation par l'hydrogène et recommandé que les prescriptions concernant ces aspects soient remises à la phase 2 des activités concernant le RTM.

2. Prescriptions nationales complémentaires par rapport aux prescriptions du RTM

157. Les prescriptions fonctionnelles de qualification (par. 5) formulent des exigences relatives à la qualification pour l'utilisation routière des systèmes de stockage de l'hydrogène. L'objectif de l'harmonisation des prescriptions, tel qu'il est incarné dans les Règlements techniques mondiaux de l'ONU, ouvre la possibilité de mettre au point des véhicules qui peuvent être mis en service dans toutes les Parties contractantes tout en répondant à des prescriptions uniformes, et donc commercialisables dans le monde entier. Il n'y a pas lieu par conséquent de prévoir des prescriptions d'homologation de type allant au-delà de prescriptions traitant de la conformité de production et des vérifications effectuées dans ce cadre concernant les caractéristiques des matériaux (y compris les prescriptions traitant de la compatibilité des matériaux du point de vue de la fragilisation par l'hydrogène).

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

158. Étant donné que les véhicules fonctionnant à l'hydrogène et la technologie des piles à combustibles en sont à un stade précoce de mise au point et de commercialisation, il est à prévoir que des révisions à ces prescriptions devront être apportées après une période prolongée d'utilisation routière réelle et sur la base d'évaluations techniques. Il est à prévoir également que lorsque l'expérience acquise ou le temps écoulé auront permis un examen technique plus poussé, les prescriptions présentées en tant que prescriptions optionnelles dans le présent document (véhicules à hydrogène liquéfié, sect. G du préambule) pourraient être adoptées comme prescriptions du RTM avec les modifications appropriées.

Les thèmes qui pourraient être pris en compte au cours de la phase 2 pourraient être les suivants:

- a) Révision possible du champ d'application pour prendre en compte d'autres classes de véhicules;
- b) Harmonisation possible des prescriptions concernant l'essai de choc;
- c) Prescriptions concernant la compatibilité des matériaux et les effets de fragilisation par l'hydrogène;
- d) Prescriptions concernant l'embout de remplissage;
- e) Évaluation de l'essai de rupture par contrainte de longue durée proposé dans le cadre de la phase 1;
- f) Examen des résultats de recherche communiqués après l'achèvement de la phase 1 – en particulier, recherches traitant de la sécurité électrique, des systèmes de stockage de l'hydrogène et de la sécurité après choc;
- g) Examen d'une valeur inférieure ou égale à 200 % de la PSN comme pression minimale d'éclatement;
- h) Examen d'un système d'écran de protection en cas de défaillance de la résistance d'isolement.

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

- a) Trois réservoirs faits du 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 à ± 10 % de la valeur médiane BPo pour l'application convenue. Ensuite,
 - i) Trois réservoirs doivent être maintenus à une pression >80 % de BPo et à $65 (\pm 5)$ °C; il ne doit pas y avoir éclatement avant 100 h; la durée jusqu'à rupture doit être enregistrée;
 - ii) Trois réservoirs doivent être maintenus à une pression >75 % de BPo et à $65 (\pm 5)$ °C; il ne doit pas y avoir éclatement avant 1 000 h; la durée jusqu'à rupture doit être enregistrée;
 - iii) Trois réservoirs doivent être maintenus à une pression >70 % de BPo et à $65 (\pm 5)$ °C; il ne doit pas y avoir éclatement avant un an;
 - iv) L'essai doit être arrêté après un an. Chaque réservoir ayant subi avec succès l'essai d'un an sans éclatement 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 muni d'un remplissage intérieur (pour réduire le volume intérieur) à condition que plus de 99 % de la surface intérieure demeure exposée;
- c) Les réservoirs construits en composite de fibre de carbone et/ou alliages métalliques sont exemptés de cet essai;
- d) Les réservoirs construits en composite de fibre de verre qui ont une pression d'éclatement initiale >350 % de la PSN sont exemptés de cet essai, auquel cas une pression BPmin = 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) Il existe des réservoirs en fibre de carbone qui utilisent la fibre de verre comme couche protectrice, et sur certains de ces réservoirs la pression d'éclatement est accrue d'environ 2 %. Dans ce cas, il doit être démontré par calcul ou par une autre méthode qu'une pression double de la pression de remplissage maximale ou supérieure peut être soutenue par l'enveloppe en fibre de carbone non comprise la fibre de verre. 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 de 225 % de la PSN $\times 1,02 = 230$ % de la PSN ou plus, les calculs ci-dessus peuvent être omis.

J. Règlements, directives et normes internationales existants

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

a) Règlements nationaux et Directives UE

- a) Union européenne – Règlement n° 79/2009 – Réception par type des véhicules à moteur fonctionnant à l'hydrogène;
- b) Union européenne – Règlement n° 406/2010 – portant application du Règlement n° 79/2009;

- 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 91 – Fuel System Integrity;
 - h) États-Unis – Federal Motor Vehicle Safety Standard (FMVSS) No. 301 – Fuel System Integrity;
 - i) États-Unis – FMVSS No. 303 – CNG Vehicles;
 - j) Chine – GB/T 24548-2009 Fuel cell electric vehicles – terminology;
 - k) Chine – GB/T 24549-2009 Fuel cell electric vehicles – safety requirements;
 - l) Chine – GB/T 24554-2009 Fuel cell engine – performance – test methods.
- b) *Normes nationales et internationales*
- a) ISO 17268 – Dispositifs de raccordement pour le ravitaillement des véhicules terrestres en hydrogène comprimé;
 - b) ISO 23273-1 – Véhicules routiers alimentés par pile à combustible – Spécifications de sécurité – Partie 1: Sécurité fonctionnelle du véhicule;
 - c) ISO 23273-2 – Véhicules routiers alimentés par pile à combustible – Spécifications de sécurité – Partie 2: Protection contre les dangers de l’hydrogène pour les véhicules utilisant de l’hydrogène comprimé;
 - d) ISO 14687-2 – Carburant hydrogène – Spécification de produit – Partie 2: Toutes applications à l’exception des piles à combustible à membrane d’échange de protons (MEP) pour les véhicules routiers;
 - e) SAE J2578 – General Fuel Cell Vehicle Safety;
 - f) SAE J2600 – Compressed Hydrogen Surface Vehicle Fueling Connection Devices;
 - g) SAE J2601 – Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles;
 - h) SAE J2799 – Hydrogen Quality Guideline for Fuel Cell Vehicles.

2. Système de stockage du carburant

- a) *Règlements nationaux et Directives UE*
- a) Chine – Regulation on Safety Supervision for Special Equipment;
 - b) Chine – Regulation on Safety Supervision 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 70MPa;
 - f) Corée – High Pressure Gas Safety Control Law;
 - g) États-Unis – FMVSS 304 – Compressed Natural Gas fuel Container Integrity;
 - h) Union européenne – Règlement no 406/2010 portant application du Règlement no 79/2009;
 - i) Chine – QC/T 816-2209 Hydrogen supplying and refueling vehicles – specifications.
- b) *Normes nationales et internationales*
- a) CSA B51 Part 2 – High-pressure cylinders for the on-board storage of natural gas and hydrogen as fuels for automotive vehicles;
 - b) CSA NGV2-2000 – Basic Requirements for Compressed Natural Gas Vehicle (NGV) Fuel Containers;
 - c) CSA TPRD-1-2009 – Pressure Relief Devices For Compressed Hydrogen Vehicle Fuel Containers;
 - d) CSA HGV 3.1-2011 – Fuel System Component for Hydrogen Gas Power Vehicles (Draft);
 - e) ISO 13985:2006 – Hydrogène liquide – Réservoirs de carburant pour véhicules terrestres;
 - f) ISO 15869:2009 – Hydrogène gazeux et mélanges d’hydrogène gazeux – Réservoirs de carburant pour véhicules terrestres (Caractéristiques techniques);
 - g) SAE J2579 – Fuel Systems in Fuel Cell and Other Hydrogen Vehicles.

3. Sécurité électrique

- a) *Règlements nationaux et Directives UE*
- a) Canada – CMVSS 305 – Véhicules à propulsion électrique: Déversement d’électrolyte et protection contre les décharges électriques;
 - b) CEE – Règlement n° 100 – Prescriptions uniformes relatives à l’homologation des véhicules électriques à batterie en ce qui concerne les prescriptions particulières applicables à la construction et à la sécurité fonctionnelle;
 - c) Japon – Attachment 101 – Technical Standard for Protection of Occupants against High Voltage in Fuel Cell Vehicles;
 - d) Japon – Attachment 110 – Technical Standard for Protection of Occupants against High Voltage in Electric Vehicles and Hybrid Electric Vehicles;
 - e) Japon – Attachment 111 – Technical Standard for Protection of Occupants against High Voltage after Collision in Electric Vehicles and Hybrid Electric Vehicles;
 - f) Corée – Motor Vehicle Safety Standard, Article 18-2 – High Voltage System;
 - g) Corée – Motor Vehicle Safety Standard, Article 91-4 – Electrolyte Spillage and Electric Shock Protection;
 - h) États-Unis – FMVSS 305 – Electric-Powered Vehicles: Electrolyte Spillage and Electrical Shock Protection.

- b) *Normes nationales et internationales*
- a) ISO 23273-3 – Véhicules routiers alimentés par pile à combustible – Spécifications de sécurité – Partie 3: Protection des personnes contre les décharges électriques;
 - b) SAE J1766 – Electric and Hybrid Electric Vehicle Battery Systems Crash Integrity Testing;
 - c) SAE J2578 – General Fuel Cell Vehicle Safety.

K. Coûts/avantages du RTM

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

160. Il est à prévoir cependant que certains coûts résulteront d'une plus large pénétration sur le marché des véhicules de cette catégorie. Ainsi, par exemple, la construction de l'infrastructure nécessaire pour permettre aux véhicules à hydrogène et à pile à combustible de devenir une alternative aux véhicules classiques impliquera des investissements assez importants pour les secteurs privé et public, selon le pays dont il s'agit. En particulier, au cours des premières années de vente des véhicules à hydrogène, les acheteurs de ceux-ci risquent de devoir faire face à un surcoût par rapport aux acheteurs de véhicules classiques à essence ou diesel; il en est de même pour les constructeurs des nouveaux véhicules à hydrogène et à pile à combustible. (Il est à noter toutefois que les coûts supportés par les acheteurs et les constructeurs seraient en grande partie volontaires, car le choix du marché ne serait pas affecté.)

161. Malgré certains coûts à prévoir, les Parties contractantes estiment que les avantages apportés par le RTM vont compenser et bien au-delà les coûts à supporter. L'utilisation à grande échelle des véhicules à hydrogène et à pile à combustible ainsi que la mise en place de l'infrastructure nécessaire pour le ravitaillement devraient permettre de réduire le nombre de véhicules à essence et diesel circulant sur les routes, ce qui devrait entraîner une baisse de la consommation mondiale de carburants d'origine fossile¹. Avantage peut-être le plus marquant, la réduction des émissions de gaz à effet de serre et des polluants réglementés (tels que le NO₂, le SO₂ et les particules) résultant de l'utilisation plus large de ces véhicules devrait apporter au fil du temps des avantages substantiels à la société par atténuation du changement climatique et réduction des coûts de santé. L'adoption du RTM pourrait aussi entraîner à terme une baisse des coûts de ravitaillement pour les utilisateurs de ces véhicules car la production d'hydrogène est potentiellement illimitée et devrait devenir de plus en plus avantageuse, du point de vue du coût, par rapport à la production de pétrole pour les véhicules classiques. En outre, la réduction de la demande de pétrole devrait être un avantage du point de vue de la gestion de l'énergie et de la sécurité nationale d'approvisionnement pour les pays où ces véhicules seraient largement utilisés, car cela

¹ Les sources renouvelables potentielles d'hydrogène incluent la production par électrolyse, la décomposition thermique de l'eau, la conversion thermo-chimique de la biomasse, les procédés par photolyse et par fermentation par micro-organismes et les systèmes photoélectriques (voir <http://www.hydrogen.energy.gov/production.html>) (consulté pour la dernière fois le 24 août 2011).

réduirait leur dépendance par rapport aux sources pétrolières étrangères². En outre, bien que ces avantages ne puissent pas être directement attribués au RTM, celui-ci pourrait avoir pour effet de favoriser le respect par les constructeurs des normes applicables en matière de consommation et d'émission de gaz à effet de serre, en favorisant le développement de la production et de l'utilisation des véhicules à hydrogène propres.

162. Les Parties contractantes n'ont pas non plus été en mesure d'évaluer les impacts nets du RTM en matière d'emploi. L'ouverture d'un nouveau marché pour les activités de conception et les technologies associées aux véhicules à hydrogène pourrait 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. Quant aux travaux de construction et de rééquipement de l'infrastructure nécessaires pour accompagner la production et le stockage d'hydrogène, ils pourraient sans doute entraîner un accroissement net du nombre d'emplois dans un avenir prévisible.

² Les sources renouvelables d'hydrogène décrites à la note 1 sont toutes susceptibles d'être produites dans le pays. Le gaz naturel, l'énergie nucléaire et le charbon peuvent être aussi des sources d'origine nationale (*source*: <http://www.hydrogen.energy.gov/production.html>) (consulté pour la dernière fois le 24 août 2011).

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 physiques pour les personnes pouvant résulter d'un incendie, d'un éclatement de récipient sous pression ou d'une explosion concernant le système d'alimentation en carburant du véhicule et/ou les décharges électriques causées par le système haute tension du véhicule.

2. Domaine d'application

Le présent Règlement s'applique à tous les véhicules à hydrogène des catégories 1-1 et 1-2, ayant un poids total en charge (PTC) inférieur ou égal à 4 536 kg.

3. Définitions

Aux fins du présent Règlement, on entend par:

- 3.1 «*Mode de marche actif*», le mode de commande du véhicule dans lequel l'application d'une pression sur la pédale d'accélérateur (ou l'actionnement d'une commande équivalente) ou le relâchement des freins commande la mise en mouvement du véhicule sous l'action de la chaîne de traction électrique;
- 3.2 «*Fonction de déconnexion automatique*», une fonction qui, lorsqu'elle est actionnée, isole de façon galvanique les sources d'énergie électrique du véhicule du reste du circuit haute tension de la chaîne de traction électrique;
- 3.3 «*Disque de rupture*», la partie fonctionnelle d'un dispositif de décompression, non refermable 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 «*Soupape antiretour*», une soupape qui empêche l'écoulement de l'hydrogène vers l'amont dans la tuyauterie d'alimentation en carburant du véhicule;
- 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 du système de stockage d'hydrogène contenant le volume primaire d'hydrogène carburant;
- 3.7 «*Couplage conducteur*», la liaison par connecteurs avec une source extérieure d'électricité lors de la charge du système rechargeable de stockage de l'énergie (SRSE);
- 3.8 «*Système de raccordement pour la recharge du système rechargeable de stockage de l'énergie (SRSE)*», le circuit électrique utilisé pour recharger le SRSE à partir d'une source électrique extérieure, y compris la prise de raccordement côté véhicule;

- 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 exécuté lors de la fabrication;
- 3.11 «*Contact direct*», le contact de personnes avec des éléments sous haute tension;
- 3.12 «*Espaces fermés ou semi-fermés*», les volumes individuels à l'intérieur du véhicule (ou du contour du véhicule traversant des ouvertures) qui sont extérieurs au système hydrogène (système de stockage, système de pile à combustible, et système de gestion du débit) et de ses enveloppes (si elles existent) où l'hydrogène peut s'accumuler (avec le danger qui en résulte), comme cela peut se produire dans l'habitacle, le compartiment à bagages, le compartiment à marchandises et l'espace situé sous le capot;
- 3.13 «*Carter de protection*», un élément qui recouvre les organes internes et protège contre tout contact direct avec eux;
- 3.14 «*Système de conversion de l'énergie électrique*», un système (pile à combustible, par exemple) qui produit et fournit l'énergie électrique nécessaire à la traction;
- 3.15 «*Chaîne de traction électrique*», l'ensemble du circuit électrique pouvant comprendre le ou les moteurs de traction et pouvant aussi comprendre le SRSE, 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 SRSE;
- 3.16 «*Masse électrique*», un ensemble d'éléments conducteurs reliés électriquement, dont le potentiel sert de référence;
- 3.17 «*Circuit électrique*», un ensemble d'éléments à haute tension interconnectés, conçu pour être sous tension dans des conditions normales de fonctionnement;
- 3.18 «*Isolation électrique*», la résistance électrique entre le rail haute tension et toute partie conductrice de la structure du véhicule;
- 3.19 «*Barrière de protection électrique*», un élément qui protège contre tout contact direct avec les éléments sous tension quel que soit l'angle d'accès;
- 3.20 «*Convertisseur électronique*», un appareil capable de réguler et/ou de convertir l'énergie électrique nécessaire à la traction;
- 3.21 «*Point d'évacuation des gaz*», le centre géométrique de la zone où le gaz de purge de la pile à combustible est évacué du véhicule;
- 3.22 «*Élément conducteur exposé*», un élément conducteur qui peut être facilement touché selon les dispositions relatives au degré de protection IPXXB et qui est mis sous tension en cas de défaut d'isolement. Il s'agit notamment des éléments protégés par un capot qui peut être enlevé sans avoir recours à des outils;
- 3.23 «*Source électrique extérieure*», une source d'énergie électrique fournissant du courant alternatif ou du courant continu située à l'extérieur du véhicule;
- 3.24 «*Système de pile à combustible*», un système comprenant les empilages d'éléments de la pile, le système de traitement de l'air, le système de commande du débit de carburant, le système d'évacuation des gaz, le système de gestion thermique et le système de gestion de l'eau;

- 3.25 «*Embout de remplissage*», l'accessoire par lequel la buse de ravitaillement de la station est raccordée au véhicule et par lequel le carburant est transféré dans le véhicule. L'embout de remplissage est utilisé comme alternative à un raccord de remplissage;
- 3.26 «*À haute tension*», la classification nominale d'un composant ou d'un circuit électrique si sa tension de fonctionnement est >60 V et $\leq 1\,500$ V en courant continu ou >30 V et $\leq 1\,000$ V en courant alternatif;
- 3.27 «*Rail haute tension*», le circuit électrique, y compris le système de raccordement pour la recharge du SRSE qui fonctionne sous haute tension;
- 3.28 «*Véhicule alimenté à l'hydrogène*», tout véhicule automobile 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 des véhicules de transport de personnes est défini dans les normes ISO 14687-2 et SAE J2719;
- 3.29 «*Système de stockage de l'hydrogène*», un réservoir sous pression, des dispositif(s) de décompression (PRD) et un dispositif d'arrêt qui isole l'hydrogène stocké du reste du système d'alimentation en carburant et de l'environnement;
- 3.30 «*Contact indirect*», le contact de personnes avec des éléments conducteurs exposés;
- 3.31 «*Élément sous tension*», un élément conducteur conçu pour être mis sous tension en conditions d'utilisation normales;
- 3.32 «*Compartiment à bagages*», l'espace réservé aux bagages sur le véhicule, et délimité par le pavillon, le capot, le plancher, les parois latérales, ainsi que par la barrière et le carter de protection destinés à protéger contre un contact direct avec des éléments sous tension de la chaîne de traction, celui-ci étant séparé de l'habitacle par la cloison avant ou la cloison arrière;
- 3.33 «*Système de stockage d'hydrogène liquéfié*», le ou les réservoir(s) de stockage d'hydrogène liquéfié, les dispositifs de décompression (PRD), la vanne d'arrêt, le système de gestion de l'évaporation et les tuyauteries de raccordement (si elles existent) 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 est de 4 % en volume (par. 83 du *Préambule*);
- 3.35 «*Pression de service maximale admissible (PSMA)*», la plus haute pression manométrique à laquelle un réservoir sous pression ou un système de stockage 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 gazeux comprimé au cours du remplissage. La pression maximale de remplissage est de 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. Pour les réservoirs à hydrogène gazeux comprimé, la PSN est la pression stabilisée du gaz comprimé dans le réservoir ou système de stockage complètement rempli à une température uniforme de 15 °C;

- 3.38 «*Système de surveillance de la résistance d'isolement*», le dispositif qui surveille la résistance d'isolement entre les rails à haute tension et la masse électrique;
- 3.39 «*Batterie de traction du type non étanche*», une batterie du type à électrolyte liquide qui libère de l'hydrogène s'échappant dans l'atmosphère;
- 3.40 «*Habitacle (aux fins d'évaluation de la sécurité électrique)*», l'espace destiné aux occupants et délimité par le pavillon, le plancher, les parois latérales, les portes, les vitrages des fenêtres, la cloison avant et la cloison arrière ou le hayon arrière, ainsi que par les barrières et carters de protection destinés à empêcher le contact direct des occupants avec des éléments sous tension;
- 3.41 «*Dispositif de décompression (PRD)*», un dispositif qui, lorsqu'il est actionné dans des conditions de fonctionnement spécifiées, laisse s'échapper l'hydrogène d'un système sous pression et évite ainsi une défaillance du système;
- 3.42 «*Soupape de surpression*», un dispositif de décompression qui s'ouvre à une pression prédéterminée et qui peut se refermer;
- 3.43 «*Protection IPXXB*», la protection contre le contact avec des parties conductrices sous haute tension assurée soit par une barrière électrique soit par une enveloppe; l'essai de contrôle se fait avec un doigt d'épreuve articulé (IPXXB), comme décrit au paragraphe 6.3.3;
- 3.44 «*Protection IPXXD*», la protection contre le contact avec des parties conductrices sous tension assurée soit par une barrière électrique soit par une enveloppe; l'essai de contrôle se fait avec un fil d'épreuve (IPXXD), comme décrit au paragraphe 6.3.3;
- 3.45 «*Système rechargeable de stockage de l'énergie (SRSE)*», le système de stockage de l'énergie rechargeable qui fournit l'énergie électrique pour la traction;
- 3.46 «*Rupture et éclatement*», les 2 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 «*Coupe-circuit d'entretien*», le dispositif permettant de mettre hors contact le circuit électrique lorsqu'il s'agit d'exécuter des contrôles et services d'entretien sur le SRSE, les piles à combustible, etc.;
- 3.48 «*Durée de vie en service*» (d'un réservoir d'hydrogène comprimé) indique la période de temps pendant laquelle le service (l'utilisation) est autorisé(e);
- 3.49 «*Vanne d'arrêt*», une vanne située entre le réservoir de stockage et le système d'alimentation en carburant du véhicule, qui peut être actionnée automatiquement; cette vanne doit par défaut revenir en position «fermée» lorsqu'elle n'est pas alimentée par une source électrique;
- 3.50 «*Défaillance simple*», une défaillance causée par un seul événement, y compris toute défaillance résultant de cette défaillance;
- 3.51 «*Isolant solide*», le revêtement isolant du faisceau de câblage destiné à recouvrir les éléments sous haute tension et à empêcher tout contact direct avec eux. Ce terme inclut les carters d'isolement des parties sous haute tension des connecteurs, ainsi que les vernis ou peintures utilisés à des fins d'isolement;

- 3.52 «*Dispositif de décompression thermocommandé (TPRD)*» un dispositif de décompression non refermable, actionné par la température, qui s'ouvre pour évacuer l'hydrogène gazeux;
- 3.53 «*Homologation de type*», la délivrance d'un certificat d'un organisme reconnu attestant que le prototype ou les échantillons de préproduction d'un véhicule spécifique, d'un système de véhicule ou d'un composant d'un système de véhicule satisfont aux prescriptions fonctionnelles pertinentes, et que les versions finales de production y satisfont également, pour autant que la conformité de production soit confirmée;
- 3.54 «*Système d'alimentation en carburant*», un ensemble de composants utilisés pour stocker et fournir l'hydrogène carburant à une pile à combustible ou à un moteur à combustion interne;
- 3.55 «*Tension de fonctionnement*», la valeur la plus élevée de la tension (en valeur efficace) d'un circuit électrique spécifiée par le constructeur ou déterminée par mesure, qui peut exister entre des éléments conducteurs dans des conditions de circuit ouvert ou dans des conditions normales de fonctionnement. Si le circuit électrique est divisé par isolement galvanique, la tension de fonctionnement est définie pour chaque circuit de l'ensemble, respectivement.

4. Applicabilité des prescriptions

- 4.1 Les prescriptions du paragraphe 5 (voir les conditions et les procédures d'essai du paragraphe 6) s'appliquent à tous les véhicules fonctionnant à l'hydrogène comprimé.
- 4.2 Les Parties contractantes à l'Accord de 1998 continueront 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 appliqueront les valeurs limites énoncées au paragraphe 5.2.2.
- 4.3 Les prescriptions du paragraphe 5.3 s'appliquent à tous les véhicules fonctionnant à l'hydrogène et à circuit électrique haute tension.

5. Prescriptions fonctionnelles

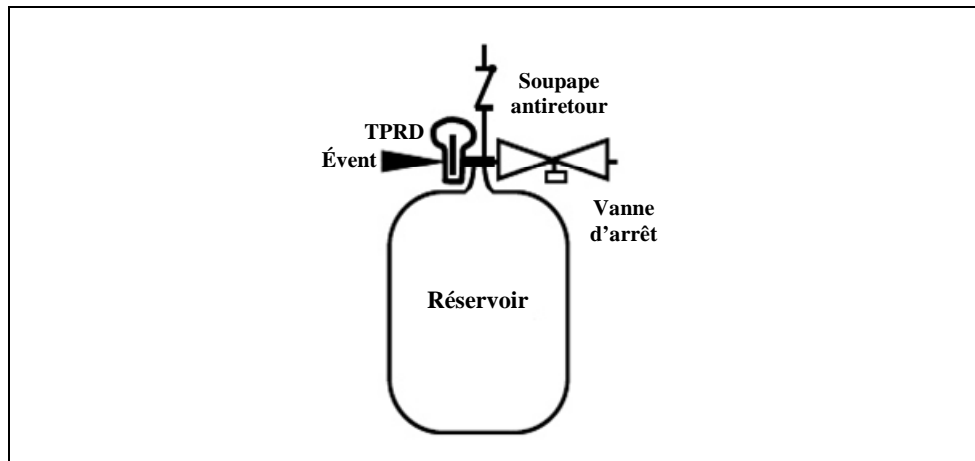
5.1 Système de stockage de l'hydrogène comprimé

La présente section contient les prescriptions visant à garantir l'intégrité du système de stockage de l'hydrogène comprimé. Celui-ci se compose d'un réservoir haute pression dont les orifices sont obturés par des dispositifs de fermeture primaires. La figure 1 représente un système de stockage de l'hydrogène comprimé d'un modèle courant, qui se compose d'un réservoir sous pression, de 3 dispositifs de fermeture et de leurs raccords. Les dispositifs de fermeture sont les suivants:

- a) Un TPRD;
- b) Une soupape antiretour qui empêche l'hydrogène de remonter dans la conduite de remplissage; et

- c) Une vanne d'arrêt qui se ferme automatiquement pour empêcher tout écoulement du réservoir vers la pile à combustible ou le moteur à combustion interne. La vanne d'arrêt ainsi que le dispositif de décompression, qui représente le dispositif de fermeture primaire du réservoir, doivent être montés directement sur ou à l'intérieur de celui-ci. En outre, au moins une soupape antiretour doit être montée directement sur ou à l'intérieur de chaque réservoir.

Figure 1

Système de stockage de l'hydrogène comprimé d'un modèle courant

Tous les nouveaux systèmes de stockage de l'hydrogène comprimé fabriqués pour des véhicules d'usage routier doivent avoir une PSN allant jusqu'à 70 MPa et une durée de vie en service maximale de 15 ans et être capables de satisfaire aux prescriptions du paragraphe 5.1

Les systèmes de stockage de l'hydrogène doivent satisfaire aux prescriptions fonctionnelles énoncées dans le présent paragraphe. Pour être qualifiés pour une utilisation routière normale, ils doivent être soumis aux essais suivants:

- 5.1.1 Essai de vérification des caractéristiques mesurées de référence
- 5.1.2 Essai de vérification de la durabilité des caractéristiques (essais hydrauliques en séquence)
- 5.1.3 Essai de vérification des caractéristiques attendues des systèmes en utilisation sur route (essais pneumatiques en séquence)
- 5.1.4 Essai de vérification de la résistance au feu (conditions de retrait du service)
- 5.1.5 Essai de vérification de la durabilité des caractéristiques des dispositifs de fermeture primaires.

Les essais particuliers correspondant à ces prescriptions fonctionnelles sont résumés dans le tableau 1 et les procédures d'essai correspondantes sont définies au paragraphe 6.

Tableau 1
Vue d'ensemble des prescriptions applicables aux essais de qualification

5.1.1	Essais de vérification des caractéristiques mesurées de référence
5.1.1.1	Pression d'éclatement initiale de référence
5.1.1.2	Nombre de cycles de pression initial de référence
5.1.2	Essai de vérification de la durabilité des caractéristiques (essais hydrauliques en séquence)
5.1.2.1	Essai de pression d'épreuve
5.1.2.2	Essai de chute (choc)
5.1.2.3	Dégâts en surface
5.1.2.4	Essais d'exposition aux agents chimiques et aux cycles de pression à température ambiante
5.1.2.5	Essai de pression statique à haute température
5.1.2.6	Cycles de pression aux températures extrêmes
5.1.2.7	Essai de pression résiduelle
5.1.2.8	Essai de résistance résiduelle à l'éclatement
5.1.3	Essai de vérification des caractéristiques attendues pour une utilisation sur route (essais pneumatiques en séquence)
5.1.3.1	Essai de pression d'épreuve
5.1.3.2	Cycles de pression à température ambiante et aux températures extrêmes (essais pneumatiques)
5.1.3.3	Essais de fuite/perméation sous une pression statique, aux températures extrêmes (essais pneumatiques)
5.1.3.4	Essai de pression résiduelle
5.1.3.5	Essai de résistance résiduelle à l'éclatement (essai hydraulique)
5.1.4	Essai de vérification de la résistance au feu (conditions de retrait du service)
5.1.5	Essai de vérification de la durabilité des dispositifs de fermeture

5.1.1 Essais de vérification des caractéristiques mesurées de référence

5.1.1.1 Pression d'éclatement initiale de référence

Trois (3) réservoirs neufs choisis au hasard dans le lot de qualification d'au moins 10 unités sont soumis à une pression hydraulique jusqu'à éclatement (voir la procédure d'essai au paragraphe 6.2.2.1). Le fabricant doit fournir la documentation nécessaire (mesures et analyses statistiques) permettant d'établir la pression médiane d'éclatement des réservoirs neufs (BP_0).

Tous les réservoirs éprouvés doivent avoir une pression d'éclatement qui ne s'écarte pas de plus de $\pm 10\%$ de la BP_0 et qui soit supérieure ou égale à une valeur minimale BP_{min} de 225 % de la PSN.

En outre, les réservoirs dont le constituant primaire est un composite de fibre de verre doivent avoir une pression minimale d'éclatement supérieure à 350 % de la PSN.

5.1.1.2 Nombre de cycles de pression initial de référence (PCL)

Trois (3) réservoirs neufs choisis au hasard dans le lot de qualification sont soumis à des cycles de pression hydraulique, à une température de $20 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ à 125 % de la PSN, sans subir de rupture pendant 22 000 cycles ou jusqu'à l'apparition d'une fuite (voir procédure d'essai au paragraphe 6.2.2.2). Selon les prescriptions particulières de la Partie contractante, ils ne doivent pas présenter de fuite avant 5 500, 7 500 ou 11 000 cycles pour une durée de vie en service de 15 ans.

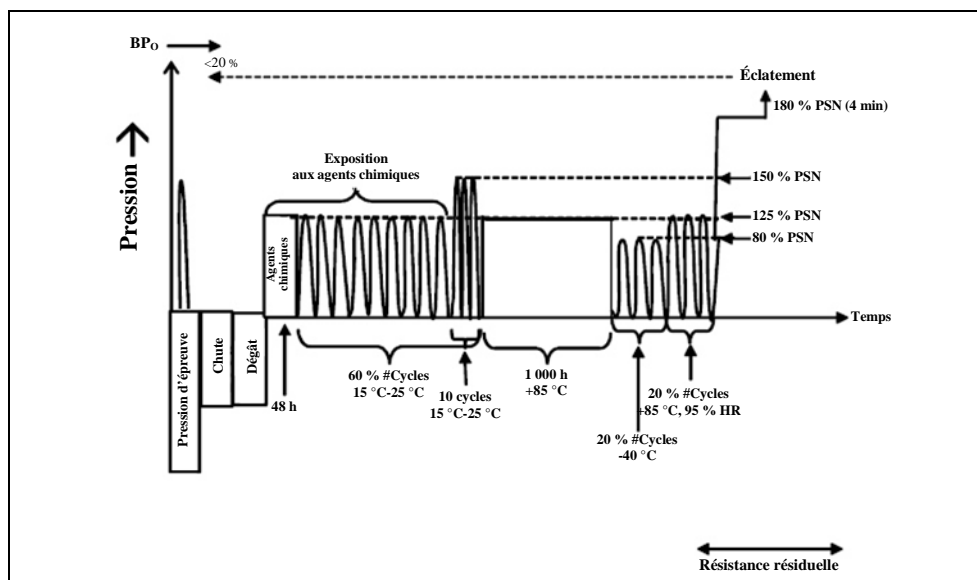
5.1.2 Essais de vérification de la durabilité des caractéristiques (essais hydrauliques en séquence)

Si les 3 réservoirs mentionnés au paragraphe 5.1.1.2 ont subi chacun un nombre de cycles supérieur à 11 000 ou compris dans une fourchette de 25 % les uns 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.

Les réservoirs ne doivent présenter aucune fuite pendant les essais décrits ci-dessous, qui sont appliqués en séquence au même réservoir, comme le montre la figure 2. Au moins un réservoir choisi parmi le lot de qualification prévu doit être soumis aux essais pour démontrer ses caractéristiques. Les procédures d'essai applicables aux réservoirs d'hydrogène sont définies en détail au paragraphe 6.2.3

Figure 2

Essai de vérification de la durabilité des caractéristiques (essais hydrauliques)

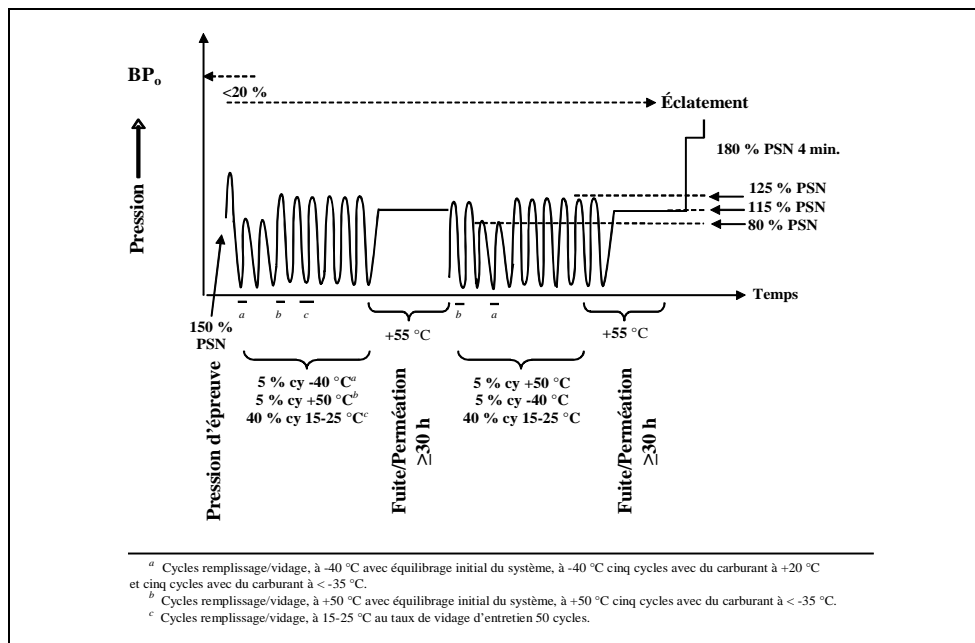


5.1.2.1 Essais de pression d'épreuve

Un réservoir est soumis à une pression égale à 150 % de la PSN, maintenue pendant 30 s (voir procédure d'essai au paragraphe 6.2.3.1). Les réservoirs qui ont subi un essai de pression d'épreuve lors de leur fabrication sont dispensés du présent essai.

- 5.1.2.2 Essai de chute (choc)
Le réservoir est soumis à des chutes selon plusieurs angles de choc (voir la procédure d'essai au paragraphe 6.2.3.2).
- 5.1.2.3 Essai de dégâts en surface
Le réservoir est soumis à un essai d'endommagement de sa surface (voir la procédure d'essai au paragraphe 6.2.3.3).
- 5.1.2.4 Exposition aux agents chimiques et essai de cycles de pression à température ambiante
Le réservoir exposé aux agents chimiques de l'environnement routier est soumis à une pression égale à 125 % de la PSN, à une température de 20 (±5) °C pendant 60 % des cycles prévus (voir la procédure d'essai au paragraphe 6.2.3.4). L'exposition aux agents chimiques est suspendue pendant les 10 derniers cycles, pendant lesquels la pression est portée à 150 % de la PSN.
- 5.1.2.5 Essai de pression statique à haute température
Le réservoir est soumis à une pression de 125 % de la PSN, à une température ≥ 85 °C pendant 1 000 h (voir la procédure d'essai au paragraphe 6.2.3.5).
- 5.1.2.6 Cycles de pression aux températures extrêmes
Le réservoir est soumis à des cycles de pression, à une température ≤ -40 °C, à une pression égale à 80 % de la PSN pendant 20 % du nombre de cycles prévu, puis à une température $\geq +85$ °C et une humidité relative de 95 %, à une pression égale à 125 % de la PSN pendant 20 % du nombre de cycles (voir la procédure d'essai au paragraphe 6.2.2.2).
- 5.1.2.7 Essai de pression résiduelle hydraulique
Le réservoir est soumis à une pression égale à 180 % de la PSN pendant 4 min sans éclatement (voir la procédure d'essai au paragraphe 6.2.3.1).
- 5.1.2.8 Essai de résistance résiduelle à l'éclatement
Le réservoir est soumis à une pression hydraulique afin de vérifier que sa pression d'éclatement est d'au moins 80 % de la pression d'éclatement initiale de référence (BP_0) définie au paragraphe 5.1.1.1 (voir la procédure d'essai au paragraphe 6.2.2.1).
- 5.1.3 Essai de vérification des caractéristiques attendues en utilisation sur route (essais pneumatiques en séquence)
Le système de stockage de l'hydrogène ne doit pas présenter de fuite pendant les divers essais prescrits dans la figure 3 ci-dessous. On trouvera les détails des procédures applicables au paragraphe 6.

Figure 3
Essai de vérification des caractéristiques attendues en utilisation sur route
(essais pneumatiques/hydrauliques)



5.1.3.1 Essai de pression d'épreuve

Le réservoir est pressurisé à 150 % de la PSN pendant 30 s (voir la procédure d'essai au paragraphe 6.2.3.1) sauf s'il a déjà subi un essai de pression d'épreuve en usine.

5.1.3.2 Essai de cycles de pression à température ambiante et aux températures extrêmes

Le système est soumis à 500 cycles de pression avec de l'hydrogène gazeux (voir la procédure d'essai au paragraphe 6.2.4.1):

- Les cycles de pression sont divisés en 2 séries: la moitié des cycles (250) sont effectués avant que le réservoir ne soit soumis à une pression statique (par. 5.1.3.3), et l'autre moitié après que le réservoir ait été soumis pour la première fois à la pression statique (par. 5.1.3.3), comme le montre la figure 3;
- Dans la première série de cycles, les 25 premiers cycles sont effectués à une pression égale à 80 % de la PSN et à une température ≤ -40 °C, les 25 cycles suivants à une pression égale à 125 % de la PSN et à une température ≥ +50 °C avec une humidité relative de 95 %, et les 200 cycles restants à une pression de 125 % de la PSN et à une température de 20 (±5) °C;

Dans la seconde série de cycles, les 25 premiers cycles sont effectués à une pression égale à 125 % de la PSN et à une température ≥ +50 °C avec une humidité relative de 95 %, les 25 cycles suivants à une pression égale à 80 % de la PSN et à une température ≤ -40 °C, et les 200 cycles restants à une pression égale à 125 % de la PSN et à une température de 20 (±5) °C;

- c) La température de l'hydrogène gazeux est ≤ -40 °C;
- d) Sur les 250 cycles de la première série, 5 cycles sont effectués alors que le carburant est à une température de $+20 (\pm 5)$ °C après que le système ait trouvé sa température d'équilibre à ≤ -40 °C, 5 cycles alors que le carburant est à une température ≤ -40 °C, et 5 cycles alors que le carburant est à une température ≤ -40 °C après que le système ait trouvé sa température d'équilibre à ≥ 50 °C, avec 95 % d'humidité relative;
- e) Il est effectué 50 cycles à une vitesse de vidage égale ou supérieure à la vitesse de vidage lors de l'entretien.

5.1.3.3 Essai de fuite/perméation sous pression statique aux températures extrêmes

- a) Cet essai est effectué après chacune des 2 séries de 250 cycles décrites au paragraphe 5.1.3.2;
- b) La quantité maximale admissible d'hydrogène s'échappant du système de stockage de l'hydrogène comprimé est de 46 ml/h/l de contenance en eau du système (voir la procédure d'essai au paragraphe 6.2.4.2);
- c) Si le taux de perméation mesuré est supérieur à 0,005 mg/s (soit 3,6 Nml/min), un essai de fuite localisé est effectué afin de s'assurer qu'en aucun point la fuite ne dépasse 0,005 mg/sec (3,6 Nml/min) (voir la procédure d'essai au paragraphe 6.2.4.3).

5.1.3.4 Pression d'épreuve résiduelle (essai hydraulique)

Le réservoir est soumis à une pression de 180 % de la PSN, pendant 4 min sans éclatement (voir la procédure d'essai au paragraphe 6.2.3.1).

5.1.3.5 Essai (hydraulique) de résistance résiduelle à l'éclatement

Le réservoir est soumis à une pression hydraulique pour s'assurer que sa pression d'éclatement ne diffère pas de plus de 20 % de la pression d'éclatement de référence définie au paragraphe 5.1.1.1 (voir la procédure d'essai au paragraphe 6.2.2.1).

5.1.4 Essai de vérification de la résistance au feu (conditions de retrait du service)

La présente section décrit l'essai de résistance au feu effectué avec de l'hydrogène comprimé. Les réservoirs soumis aux essais doivent être reconnus par toutes les Parties contractantes à l'Accord de 1998 mais celles-ci ont la possibilité d'utiliser de l'air comprimé à la place de l'hydrogène comprimé pour l'homologation de réservoirs qui seront utilisés exclusivement dans leur pays ou leur région.

Pour l'essai, un réservoir à hydrogène est soumis à une pression égale à la PSN et exposé au feu (voir la procédure d'essai au paragraphe 6.2.5.1). Un dispositif de décompression thermocommandé doit évacuer les gaz contenus dans le réservoir de manière contrôlée sans rupture.

5.1.5 Essai de vérification pour la durabilité des dispositifs de fermeture primaires

Les fabricants doivent tenir des registres prouvant que les dispositifs de fermeture des réservoirs d'hydrogène à haute pression (les dispositifs de décompression thermocommandés, les soupapes antiretour et les vannes d'arrêt tels qu'ils sont représentés à la figure 1) sont conformes aux prescriptions énoncées dans le reste de la présente section.

La totalité du système de stockage n'a pas besoin d'être requalifiée (par. 5.1) si ses dispositifs de fermeture (éléments représentés à la figure 1 à l'exclusion du réservoir) sont remplacés par des dispositifs équivalents, dont les fonctions, les raccords, le matériau, la résistance et les dimensions sont comparables et qui ont subi les mêmes essais de qualification que les éléments d'origine. Cependant, toute modification physique d'un dispositif de décompression thermocommandé, de son emplacement ou de ses conduits d'évacuation nécessite une requalification conformément au paragraphe 5.1.4.

5.1.5.1 Prescriptions de qualification des dispositifs de décompression thermocommandés

Les essais de qualification de la conception doivent être effectués sur des dispositifs de décompression finis, de fabrication courante. Les dispositifs de décompression thermocommandés doivent satisfaire aux prescriptions de qualification ci-dessous:

- a) Cycles de pression (par. 6.2.6.1.1);
- b) Essai accéléré de durée de vie (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 par le sel (par. 6.2.6.1.4);
- e) Essai d'exposition aux agents chimiques de l'environnement automobile (par. 6.2.6.1.5);
- f) Essai de fissuration par corrosion sous tension (par. 6.2.6.1.6);
- g) Essai de chute et de vibrations (par. 6.2.6.1.7);
- h) Essai d'étanchéité (par. 6.2.6.1.8);
- i) Essai d'actionnement au banc (par. 6.2.6.1.9);
- j) Essai de débit (par. 6.2.6.1.10).

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

Les essais de qualification doivent être effectués sur des soupapes antiretour et des vannes d'arrêt finies, de fabrication courante. Elles 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) Cycles de pression aux températures extrêmes (par. 6.2.6.2.3);
- d) Essai de résistance à la corrosion par le sel (par. 6.2.6.2.4);
- e) Essai d'exposition aux agents chimiques de l'environnement automobile (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 vibrations (par. 6.2.6.2.8);
- i) Essai de fissuration par corrosion sous tension (par. 6.2.6.2.9);
- j) Essai d'exposition à l'hydrogène prérefroidi (par. 6.2.6.2.10).

- 5.1.6 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 la fabrication, PSN, type de carburant et date de retrait du service. Le nombre de cycles effectués lors de l'essai défini au paragraphe 5.1.1.2 doit aussi figurer sur chaque réservoir. Les étiquettes apposées sur le réservoir conformément à la présente section doivent rester en place et être lisibles pendant la durée de service recommandée par le fabricant.
- La date de retrait du service ne doit pas être fixée au-delà de 15 ans après la date de fabrication
- 5.2 Système d'alimentation en carburant du véhicule
- La présente section définit les prescriptions applicables à l'intégrité du système d'alimentation en hydrogène carburant, à savoir le réservoir, les canalisations, les joints et tous les autres composants en contact avec l'hydrogène.
- 5.2.1 Intégrité du système d'alimentation en carburant en utilisation normale
- 5.2.1.1 Prescriptions applicables à l'embout de remplissage
- 5.2.1.1.1 Un embout de remplissage de l'hydrogène comprimé empêche qu'il ne s'échappe dans l'atmosphère. Sa vérification se fait de façon visuelle.
- 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, PSN 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 franc de la buse de ravitaillement. L'embout doit être protégé contre toute manipulation non autorisée et toute entrée de poussières ou d'eau (il doit par exemple être placé dans un compartiment qui peut être verrouillé). 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 non plus 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 contre la surpression du système basse pression
(voir la procédure d'essai au paragraphe 6.1.6)
- La partie basse pression du système en aval du détendeur doit être protégée contre toute surpression due à une défaillance éventuelle de ce dernier. La pression à laquelle le dispositif de protection contre la surpression s'actionne doit être au plus égale à la pression de travail 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) Dispositifs de décompression thermocommandés montés sur le système de stockage. S'il existe un évent pour l'évacuation de l'hydrogène libéré par ces dispositifs, son orifice de sortie doit être protégé par un couvercle;

- b) Dispositifs de décompression thermocommandés montés sur le système de stockage. Si de l'hydrogène gazeux s'échappe d'un ou de plusieurs de ces dispositifs, le flux ne doit pas être envoyé:
 - i) Dans des espaces fermés ou semi-fermés;
 - ii) Dans ou en direction d'un passage de roue;
 - iii) Vers des réservoirs d'hydrogène gazeux;
 - iv) En avant du véhicule, ou à l'horizontale (parallèlement au sol) depuis l'arrière ou les côtés du véhicule;
- c) D'autres dispositifs de décompression (par exemple un disque de rupture) peuvent être montés en dehors du système de stockage d'hydrogène. L'hydrogène gazeux libéré par ces autres dispositifs ne doit pas être envoyé:
 - i) Vers des bornes électriques de raccordement exposées ou des interrupteurs électriques exposés ou encore toute autre source d'inflammation;
 - ii) Dans ou en direction de l'habitacle du véhicule ou du compartiment de chargement;
 - iii) Dans ou en direction d'un passage de roue;
 - iv) Vers des réservoirs d'hydrogène gazeux.

5.2.1.3.2 Système d'échappement du véhicule (voir la procédure d'essai au paragraphe 6.1.4)

À la sortie du système d'échappement du véhicule, la teneur en hydrogène des gaz d'échappement:

- a) Ne doit pas dépasser 4 % (en volume) en moyenne mobile sur une fenêtre de 3 s en fonctionnement normal, y compris les phases de démarrage et d'arrêt du moteur;
- b) Ne doit dépasser 8 % à aucun moment (voir la procédure d'essai au paragraphe 6.1.4).

5.2.1.4 Protection contre le risque d'incendie: cas d'une défaillance simple

5.2.1.4.1 En cas de fuite/perméation d'hydrogène depuis le système de stockage, l'hydrogène ne doit s'échapper directement ni dans l'habitacle, ni dans le compartiment à bagages, ni dans le compartiment de chargement, ni dans aucun espace fermé ou semi-fermé à l'intérieur du véhicule contenant une source d'inflammation non protégée.

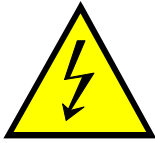
5.2.1.4.2 Une défaillance simple survenant en aval de la vanne d'arrêt principale ne doit pas causer une fuite telle qu'une concentration d'hydrogène quelle qu'elle soit puisse être présente en un point quelconque de l'habitacle, conformément à la procédure d'essai du paragraphe 6.1.3.2.

5.2.1.4.3 Si, pendant le fonctionnement, une défaillance simple cause une fuite telle que la concentration d'hydrogène dans l'air dépasse $2 \pm 1,0$ % en volume dans un ou plusieurs des espaces fermés ou semi-fermés du véhicule, un signal d'alarme doit s'actionner (voir par. 5.2.1.6). Si la concentration dépasse $3 \pm 1,0$ %, la vanne d'arrêt principale doit se fermer pour isoler le réservoir (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 et les autres parties du circuit 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 Signal d'alarme adressé au conducteur au moyen d'un voyant
- Le conducteur doit être prévenu au moyen d'un signal visuel ou par l'affichage d'un texte répondant aux conditions suivantes:
- Il doit être visible pour le conducteur assis en position de conduite et ceinture de sécurité attachée;
 - Il doit être de couleur jaune en cas de défaillance du système de détection et de couleur rouge si les conditions énoncées au paragraphe 5.2.1.4.3 sont remplies;
 - Lorsqu'il est allumé, il doit être visible pour le conducteur aussi bien de jour que de nuit;
 - Il doit rester allumé en cas de présence d'une concentration d'hydrogène égale ou supérieure à $2 \pm 1,0$ % ou de défaillance du système de détection et si la commande de mise en marche est en position «marche» ou si le système de propulsion est activé.
- 5.2.2 Intégrité du système d'alimentation en carburant après choc
- 5.2.2.1 Limite de la fuite de carburant
- Le débit volumique d'hydrogène gazeux de la fuite ne doit pas dépasser une valeur moyenne de 118 Nl/min au cours des 60 min qui suivent l'accident (voir les procédures d'essai au paragraphe 6.1.1).
- 5.2.2.2 Limite de concentration en espace fermé
- La fuite d'hydrogène gazeux ne doit pas causer la présence d'une concentration d'hydrogène dans l'air supérieure à $3 \pm 1,0$ % en volume dans l'habitacle, le compartiment à bagages ou le compartiment de chargement (voir les procédures d'essai au paragraphe 6.1.2). On considère qu'il est satisfait à cette prescription s'il est prouvé que la vanne d'arrêt du système de stockage s'est fermée au plus tard 5 s après le choc et s'il n'a eu aucune fuite du système de stockage.
- 5.2.2.3 Déplacement du réservoir
- Le ou les réservoirs doivent rester fixés au véhicule au moins par un point.
- 5.3 Sécurité électrique
- 5.3.1 Prescriptions relatives à la sécurité électrique – en utilisation normale
- 5.3.1.1 Généralités
- Le paragraphe 5.3.1 s'applique à la chaîne de traction électrique des véhicules à pile à combustible équipés d'un ou plusieurs moteurs de traction mus par l'électricité et non raccordés en permanence au réseau, et aux composants et systèmes à haute tension qui sont galvaniquement reliés au rail haute tension de la chaîne de traction électrique.

- 5.3.1.2 Prescriptions relatives à la protection contre les décharges électriques
- 5.3.1.2.1 Protection contre les décharges électriques
- Les prescriptions de sécurité électrique énoncées ici s'appliquent aux rails haute tension dans les cas où ils ne sont pas raccordés à une source d'énergie électrique à haute tension extérieure.
- 5.3.1.2.2 Protection contre le contact direct
- La protection contre le contact direct avec des éléments sous tension doit satisfaire aux dispositions des paragraphes 5.3.1.2.2.1 et 5.3.1.2.2.2. Les éléments de protection (isolant solide, barrière électrique, carter de protection, etc.) ne doivent pas pouvoir être ouverts, démontés ou enlevés sans l'usage d'outils.
- 5.3.1.2.2.1 Pour la protection des éléments sous tension situés à l'intérieur de l'habitacle ou du compartiment à bagages, il doit être satisfait au degré de protection IPXXD.
- 5.3.1.2.2.2 Pour la protection des éléments sous tension situés dans les zones autres que l'habitacle ou le compartiment à bagages, il doit être satisfait au degré de protection IPXXB.
- 5.3.1.2.2.3 Connecteurs
- Les connecteurs (y compris la prise d'alimentation du véhicule) sont considérés comme répondant à cette prescription:
- S'ils satisfont aux dispositions des paragraphes 5.3.1.2.2.1 et 5.3.1.2.2.2 lorsqu'ils sont désaccouplés sans l'usage d'outils; ou
 - S'ils sont situés sous le plancher et sont munis d'un mécanisme de verrouillage; ou
 - S'ils sont munis d'un mécanisme de verrouillage et protégés par d'autres composants qui doivent être enlevés avec des outils en vue de désaccoupler le connecteur; ou
 - Si la tension des éléments sous tension tombe à 60 Vcc ou moins ou 30 Vca (eff.) ou moins dans un délai de 1 s au plus après désaccouplement du connecteur.
- 5.3.1.2.2.4 Coupe-circuit de service
- Pour un coupe-circuit de service qui peut être ouvert, démonté ou enlevé sans outils, il est acceptable que la protection satisfasse à l'indice IPXXB dans les cas où ce raccord est ouvert, démonté ou déposé sans outils.
- 5.3.1.2.2.5 Marquage
- 5.3.1.2.2.5.1 Le symbole représenté à la figure 4 doit être apposé sur le système rechargeable de stockage de l'énergie électrique (SRSE) ou à proximité de celui-ci. L'arrière-fond du symbole doit être jaune, le liseré et l'éclair doivent être noirs.

Figure 4
Marquage de l'équipement à haute tension



- 5.3.1.2.2.5.2 Le symbole doit être apposé de manière visible sur les carter et barrières de protection électrique qui, lorsqu'ils sont enlevés, donnent accès à des éléments sous tension des circuits haute tension. Cette prescription est facultative pour les connecteurs situés sur les rails haute tension. Elle ne s'applique pas dans les cas suivants:
- a) Lorsque les barrières ou carter de protection électrique ne sont pas accessibles physiquement, et ne peuvent pas être ouverts ou enlevés sans avoir à déposer d'autres composants du véhicule avec des outils;
 - b) Lorsque les barrières ou carter de protection électrique sont situés sous le plancher du véhicule.
- 5.3.1.2.2.5.3 Les câbles des rails haute tension, lorsqu'ils ne sont pas sous carter de protection, doivent être identifiés par une gaine de couleur orange.
- 5.3.1.2.3 Protection contre le contact indirect
- 5.3.1.2.3.1 Pour la protection contre un risque de décharge électrique résultant d'un contact indirect, les éléments conducteurs exposés, tels qu'une barrière ou un carter de protection électrique conducteur, doivent être reliés galvaniquement et fixés à la masse électrique par liaison avec un câble électrique ou un câble de masse, ou par soudage, ou par liaison au moyen de vis, de manière à éviter qu'ils puissent être portés à un potentiel dangereux.
- 5.3.1.2.3.2 La résistance entre toutes les parties conductrices exposées et la masse électrique, mesurée sous une intensité d'au moins 0,2 A, doit être inférieure à 0,1 Ω . Elle doit être prouvée par l'une des méthodes d'essai exposées au paragraphe 6.3.4.
- On considère qu'il est satisfait à cette prescription si la liaison galvanique a été effectuée par soudage. En cas de doute, il sera procédé à une mesure.
- 5.3.1.2.3.3 Dans le cas des véhicules automobiles qui sont conçus pour être raccordés par l'intermédiaire d'un couplage conducteur à la source d'énergie électrique extérieure mise à la terre, un dispositif permettant la liaison galvanique entre la masse électrique du véhicule et la prise de terre extérieure doit exister.
- Ce dispositif devrait permettre de raccorder le véhicule à la prise de terre avant que la tension de la source extérieure soit appliquée au véhicule et de le maintenir raccordé jusqu'à ce que la tension de la source extérieure cesse de l'être.
- La conformité à cette prescription peut être prouvée soit par un essai pratique utilisant le connecteur spécifié par le constructeur du véhicule, soit par une analyse technique (inspection visuelle, croquis, etc., par exemple).

5.3.1.2.4 Système de surveillance de la résistance d'isolement

5.3.1.2.4.1 Dans le cas des véhicules à pile à combustible, les rails haute tension à courant continu doivent être pourvus d'un système embarqué de surveillance de la résistance d'isolement, comportant un dispositif d'alarme à l'intention du conducteur si la résistance d'isolement tombe en dessous de la valeur minimale prescrite ($100 \Omega/V$). Le bon fonctionnement du système embarqué de surveillance de la résistance d'isolement doit être confirmé selon la méthode décrite au paragraphe 6.3.2.

La résistance d'isolement entre le rail haute tension du système de raccordement pour la charge du système rechargeable de stockage de l'énergie, qui n'est pas sous tension sauf pendant la charge du SRSE, et la masse électrique, n'a pas à être surveillée.

5.3.1.2.4.2 Chaîne de traction électrique comportant des rails séparés à courant continu ou à courant alternatif

Si les rails haute tension à courant continu et les rails haute tension à courant alternatif sont galvaniquement isolés les uns des autres, la résistance d'isolement entre le rail à haute tension et la masse électrique doit être au minimum de $100 \Omega/V$ de tension de fonctionnement pour rails à courant continu, et de $500 \Omega/V$ de tension de fonctionnement pour les rails à courant alternatif.

La mesure doit être effectuée conformément aux dispositions du paragraphe 6.3.1.

5.3.1.2.4.3 Chaîne de traction électrique comportant des rails à courant continu et à courant alternatif combinés

Si les rails haute tension à courant alternatif et les rails haute tension à courant continu sont reliés galvaniquement, la résistance d'isolement entre le rail haute tension et la masse électrique doit avoir une valeur minimale de $500 \Omega/V$ de tension de fonctionnement.

Toutefois, si tous les rails haute tension à courant alternatif sont protégés par l'une des 2 méthodes mentionnées ci-après, la résistance d'isolement entre le rail haute tension et la masse électrique doit avoir une valeur minimale de $100 \Omega/V$ de tension de fonctionnement:

- a) Couche double ou plus d'isolants solides, barrières ou carters de protection électrique satisfaisant aux prescriptions du paragraphe 5.3.1.2.3, indépendamment, pour le faisceau de câblage par exemple;
- b) Enceintes de protection robustes mécaniquement, suffisamment durables pour toute la durée de service du véhicule, dans le cas des carters moteurs, carters de convertisseurs électroniques ou connecteurs.

5.3.1.2.4.4 Prescriptions concernant la résistance d'isolement du système de raccordement pour la recharge du SRSE

Dans le cas de la prise de raccordement du véhicule conçue pour être reliée par conduction à la source de courant électrique alternatif extérieure mise à la terre et le circuit électrique qui est relié galvaniquement à la prise de raccordement du véhicule lors de la charge du SRSE, la résistance d'isolement entre le rail haute tension et la masse électrique doit être au

moins égale à 1 MΩ lorsque le raccord du chargeur est déconnecté. Au cours de la mesure, le SRSE peut être déconnecté. La mesure doit être effectuée conformément aux dispositions du paragraphe 6.3.1.

5.3.1.3 Sécurité fonctionnelle

Un signal au moins temporaire doit être émis à l'intention du conducteur lorsque le véhicule est sur le «mode actif de marche».

Cette disposition toutefois ne s'applique pas dans les cas où un moteur à combustion interne fournit directement ou indirectement la puissance de traction du véhicule au démarrage.

Lorsqu'il quitte le véhicule, le conducteur doit être informé par un signal (optique ou acoustique) si le véhicule est encore sur le mode actif de marche.

Si le SRSE du véhicule peut être rechargé depuis l'extérieur, tout déplacement du véhicule sous l'action de son propre système de traction doit être impossible tant que le connecteur de la source extérieure d'énergie électrique est physiquement raccordé à la prise d'alimentation du véhicule.

Pour le contrôle du respect de cette prescription, le connecteur spécifié par le constructeur du véhicule doit être utilisé.

La position du dispositif de commande du sens de marche doit être clairement indiquée au conducteur.

5.3.2 Prescriptions relatives à la sécurité électrique – après choc

5.3.2.1 Généralités

Les véhicules à pile à combustible équipés d'une chaîne de traction électrique doivent satisfaire aux prescriptions des paragraphes 5.3.2.2 à 5.3.2.4. La démonstration peut en être faite lors d'un essai de choc distinct, pour autant que les composants électriques n'aient pas d'influence sur l'efficacité en matière de protection des occupants du type de véhicule considéré, telle qu'elle est prescrite dans la réglementation relative aux essais de choc. Si tel est le cas, le respect des prescriptions énoncées aux paragraphes 5.3.2.2 à 5.3.2.4 doit être vérifié conformément aux méthodes définies au paragraphe 6.3.5.

5.3.2.2 Protection contre les décharges électriques

Après le choc, l'un au moins des 3 critères énoncés aux paragraphes 5.3.2.2.1 à 5.3.2.2.3 doit être rempli.

Si le véhicule est équipé d'une fonction de déconnexion automatique, ou d'un ou de plusieurs dispositifs qui isolent de façon galvanique le circuit de la chaîne de traction électrique pendant la conduite, l'un au moins des critères ci-dessous doit s'appliquer au circuit déconnecté ou à chacun des circuits isolés après la déconnexion. Les critères définis au paragraphe 5.3.2.2.2 ne s'appliquent cependant pas si plus d'un potentiel d'une partie du rail haute tension ne bénéficie pas d'un indice de protection IPXXB.

Si l'essai est effectué alors qu'une ou plusieurs parties du système haute tension ne sont pas sous tension, la protection contre toute décharge électrique pour la ou les parties en question doit être assurée conformément au paragraphe 5.3.2.2.2 ou au paragraphe 5.3.2.2.3.

- 5.3.2.2.1 Absence de haute tension
- Les tensions V_b , V_1 et V_2 des rails haute tension doivent être inférieures ou égales à 30 V en courant alternatif ou à 60 V en courant continu dans les 60 s suivant le choc, comme indiqué aux paragraphes 6.3.5 et 6.3.5.2.2.
- 5.3.2.2.2 Résistance d'isolement
- Les critères définis aux paragraphes 5.3.2.2.2.1 et 5.3.2.2.2.2 ci-dessous doivent être remplis.
- La mesure doit être effectuée conformément aux dispositions du paragraphe 6.3.5.2.3.
- 5.3.2.2.2.1 Chaîne de traction électrique comportant des rails à courant continu et à courant alternatif distincts
- Si les rails haute tension à courant continu et les rails haute tension à courant alternatif sont isolés les uns des autres galvaniquement, la résistance d'isolement entre le rail à haute tension et la masse électrique (R_i , selon la définition du paragraphe 6.3.5.2.3) doit être au minimum de 100 Ω/V de tension de fonctionnement pour les rails à courant continu, et de 500 Ω/V de tension de fonctionnement pour les rails à courant alternatif.
- 5.3.2.2.2.2 Chaîne de traction électrique comportant des rails à courant continu et à courant alternatif combinés
- Si les rails haute tension à courant alternatif et les rails haute tension à courant continu sont reliés galvaniquement, ils doivent satisfaire à l'une des conditions suivantes:
- La résistance d'isolement entre le rail à haute tension et la masse électrique (R_i , selon la définition du paragraphe 6.3.5.2.3) doit être au minimum de 500 Ω/V de tension de fonctionnement;
 - La résistance d'isolement entre le rail à haute tension et la masse électrique (R_i , selon la définition du paragraphe 6.3.5.2.3) doit être au minimum de 100 Ω/V de tension de fonctionnement et le bus à courant alternatif répond aux critères de protection physique indiqués au paragraphe 5.3.2.2.3;
 - La résistance d'isolement entre le rail à haute tension et la masse électrique (R_i , selon la définition du paragraphe 6.3.5.2.3) doit être au minimum de 100 Ω/V de tension de fonctionnement et le rail à courant alternatif satisfait au critère d'absence de haute tension, comme indiqué au paragraphe 5.3.2.2.1.
- 5.3.2.2.3 Protection physique
- Les Parties contractantes peuvent choisir d'adopter la protection physique. Pour la protection contre tout contact direct avec les éléments sous haute tension, l'indice de protection IPXXB doit être appliqué.
- De plus, aux fins de la protection contre tout risque de décharge électrique résultant d'un contact indirect, la résistance entre toutes les parties conductrices exposées et la masse électrique, mesurée sous une intensité d'au moins 0,2 A, doit être inférieure à 0,1 Ω .
- On considère qu'il est satisfait à cette prescription si la liaison galvanique a été effectuée par soudage. En cas de doute, il sera procédé à une mesure.

- 5.3.2.3 Fuites d'électrolyte
- Au cours des 30 min qui suivent le choc, il ne doit y avoir aucune fuite d'électrolyte du SRSE dans l'habitacle, ni fuite de plus de 7 % d'électrolyte à l'extérieur de l'habitacle.
- Le constructeur doit apporter la preuve de la conformité aux prescriptions du paragraphe 6.3.5.2.6.
- 5.3.2.4 Maintien en place du SRSE
- Tout SRSE installé à l'intérieur de l'habitacle doit demeurer à l'emplacement où il a été installé, et ses éléments doivent rester à l'intérieur du système.
- Aucun élément d'un SRSE se trouvant à l'extérieur de l'habitacle aux fins de l'évaluation de la sécurité électrique ne doit pénétrer dans ce dernier pendant ou après l'essai de choc.
- Le constructeur doit apporter la preuve de la conformité avec les prescriptions du paragraphe 6.3.5.2.7.

6. Conditions et procédures d'essai

- 6.1 Essais de conformité en ce qui concerne l'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 procéder à un essai de choc, il convient de mettre en place dans le système de stockage d'hydrogène des instruments destinés à prendre les mesures de pression et de température requises, si le véhicule type n'est pas déjà équipé d'instruments offrant la précision souhaitée.
- Le système de stockage est ensuite purgé, si nécessaire, conformément aux instructions du fabricant, afin d'éliminer les impuretés se trouvant dans le réservoir avant de remplir le système avec de l'hydrogène ou de l'hélium comprimé. Sachant que la pression dans le système varie selon la température, la pression de remplissage visée est fonction de cette dernière. La pression visée est déterminée comme suit:
- $$P_{\text{target}} = \text{NWP} \times (273 + T_0) / 288$$
- 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 visée une fois que la température s'est stabilisée.
- Le réservoir est rempli au minimum à 95 % de la pression de remplissage visée, puis laissé en l'état de façon à permettre la stabilisation avant l'exécution de l'essai de choc.
- La vanne d'arrêt principale, ainsi que les autres vannes d'arrêt pour l'hydrogène, situées en aval dans le circuit d'hydrogène, sont maintenues ouvertes immédiatement avant le choc.

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

La pression de l'hydrogène, P_0 (MPa), et la température, T_0 (°C), sont mesurées immédiatement avant le choc, puis au terme d'un intervalle de temps déterminé, Δt (min), après celui-ci. L'intervalle, Δt , est d'une durée de 60 min au moins à partir du moment où le véhicule s'est immobilisé après le choc. On peut le prolonger, si nécessaire, pour améliorer la précision de mesure dans le cas d'un système de stockage à grand volume fonctionnant à une pression pouvant atteindre 70 MPa. Δt peut alors être calculé comme suit:

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

où

$R_s = P_s / \text{NWP}$, P_s étant la plage de pressions du capteur de pression (MPa), NWP, 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 calculée pour Δt est inférieure à 60 min, Δt est fixé à 60 min.

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

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

$$\rho_o' = -0,0027 \times (P_o')^2 + 0,75 \times P_o' + 0,5789$$

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

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

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

$$\rho_f' = -0,0027 \times (P_f')^2 + 0,75 \times P_f' + 0,5789$$

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

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 dans l'intervalle de temps (qui doit être inférieur à ce qui est indiqué au paragraphe 5.2.2.1) est par conséquent calculé 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) dans l'intervalle de temps et l'expression $(P_{\text{target}} / P_o)$, le terme appliqué pour compenser les différences entre la pression initiale mesurée, P_o , et la pression de remplissage visée, P_{target} .

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

La pression de l'hélium, P_o (MPa), et la température, T_o (°C), sont mesurées immédiatement avant le choc, puis au terme d'un intervalle de temps prédéterminé après celui-ci. L'intervalle, Δt , est d'une durée de 60 min au moins à partir du moment où le véhicule s'est immobilisé après le choc.

On peut le prolonger, si nécessaire, pour améliorer la précision de mesure dans le cas d'un système de stockage à grand volume fonctionnant à une pression pouvant atteindre 70 MPa. Δt peut alors être calculé comme suit:

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

où

$R_s = P_s / \text{NWP}$, P_s étant la plage de pressions du capteur de pression (MPa), NWP, 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 obtenue pour Δt est inférieure à 60 min, Δt est fixé à 60 min.

La masse initiale de l'hydrogène 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 de l'hydrogène dans le système de stockage 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 dans l'intervalle de temps est par conséquent calculé comme suit:

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

où

V_{He} est le débit volumique moyen (NI/min) dans l'intervalle de temps et l'expression P_o / P_{target} , le terme appliqué pour compenser les différences entre la pression initiale mesurée, P_o , et la pression de remplissage visée, P_{target} .

La conversion du débit volumique moyen d'hélium en débit volumique moyen d'hydrogène s'effectue comme suit:

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

où

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

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

Les données de mesure doivent être enregistrées au cours de l'essai de choc visant à mesurer les fuites éventuelles d'hydrogène (ou d'hélium) (voir la procédure d'essai au paragraphe 6.1.1).

Il convient de choisir des capteurs permettant de mesurer soit l'accumulation d'hydrogène ou d'hélium, soit la diminution de la teneur en oxygène (résultant de l'effet de déplacement causé par les fuites d'hydrogène ou d'hélium).

Les capteurs doivent être étalonnés à partir de références reconnues de façon à offrir une précision de $\pm 5\%$ pour la concentration visée de 4 % d'hydrogène ou 3 % d'hélium par volume d'air, et une plage de mesure maximale dépassant d'au moins 25 % ces valeurs. Ils doivent pouvoir répondre à 90 % à une variation de la concentration de toute l'échelle dans un délai de 10 s.

Avant de procéder à l'essai de choc, on dispose les capteurs dans l'habitacle, le compartiment à bagages et le compartiment de chargement du véhicule comme suit:

- a) À 250 mm au maximum du garnissage de pavillon au-dessus du siège conducteur ou près du sommet de l'habitacle en sa partie centrale;
- 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 sommet du compartiment à bagages et du compartiment de chargement du véhicule qui ne sont pas directement affectés par l'essai de choc à réaliser.

Les capteurs doivent être montés solidement sur la structure ou les sièges du véhicule et protégés, en vue de l'essai de choc, des fragments, des gaz émis par les coussins gonflables et des objets projetés. Les données de mesure recueillies après le choc sont enregistrées par des instruments placés dans le véhicule ou situés à distance (téléométrie).

Le véhicule peut être placé à l'extérieur, en un endroit protégé du vent et des éventuels effets du soleil, ou à l'intérieur, dans un espace suffisamment grand ou ventilé, de façon à éviter une accumulation d'hydrogène au-delà de 10 % des valeurs visées pour l'habitacle, le compartiment à bagages et le compartiment de chargement.

La collecte des données de mesure dans les espaces fermés à la suite du choc débute lorsque le véhicule s'est immobilisé. Les données relevées par les capteurs sont collectées toutes les 5 s au moins, durant 60 min après le choc. Un déphasage du premier ordre (constante de temps) pouvant aller jusqu'à 5 s peut être appliqué aux mesures pour effectuer un «lissage» et filtrer les effets des données aberrantes.

Les valeurs filtrées obtenues de chaque capteur doivent être inférieures aux valeurs visées, à savoir $3 \pm 1,0\%$ pour l'hydrogène et $2,25 \pm 0,75\%$ pour l'hélium à tout moment durant la période d'essai de 60 min après le choc.

6.1.3 Essai de conformité en cas de défaillance simple

L'une ou l'autre des procédures d'essai présentées aux paragraphes 6.1.3.1 ou 6.1.3.2 doit être exécutée:

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

6.1.3.1.1 Conditions d'essai

6.1.3.1.1.1 Véhicule d'essai. Le système de propulsion du véhicule d'essai est démarré, porté à sa température normale de fonctionnement et laissé en marche durant la période de l'essai. S'il ne s'agit pas d'un véhicule à pile à combustible, il convient de le porter à température 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. On utilise 2 mélanges d'air et d'hydrogène: une concentration de $2 \pm 1,0$ % (ou moins) d'hydrogène dans l'air pour contrôler la fonction d'alarme, et une concentration de $3 \pm 1,0$ % (ou moins) pour contrôler la fonction d'arrêt du gaz. Les concentrations appropriées doivent être choisies en fonction des recommandations du fabricant (ou des caractéristiques du détecteur).
- 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.
- Un tuyau d'admission du gaz d'essai est raccordé au détecteur de fuites d'hydrogène;
 - Le détecteur est recouvert d'un capot, pour retenir le gaz à proximité de ce dernier.
- 6.1.3.1.2.2 Exécution de l'essai
- Du gaz d'essai est envoyé vers le détecteur de fuites d'hydrogène;
 - Le fonctionnement normal du système d'alarme est confirmé par un essai réalisé avec du gaz pour contrôler la fonction d'alarme;
 - La fermeture de la vanne d'arrêt principale est confirmée par un essai avec du gaz visant à contrôler la fonction de fermeture. Le contrôle du courant électrique alimentant la vanne principale d'arrêt ou le bruit émis par la fermeture de celle-ci permettent de confirmer qu'elle fonctionne bien.
- 6.1.3.2 Procédure d'essai pour vérifier le respect des prescriptions en ce qui concerne les espaces fermés et les 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 aux conditions ambiantes lors de l'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 commander à distance des évacuations d'hydrogène à partir du système de stockage d'hydrogène. Le nombre, l'emplacement et la capacité de débit des points d'évacuation en aval de la vanne d'arrêt principale sont définis par le constructeur du véhicule sur la base des scénarios de fuite les plus défavorables. Au minimum, le débit total de toutes les évacuations commandées à distance doit permettre d'actionner les fonctions automatiques d'alarme et de fermeture.
- 6.1.3.2.1.4 Aux fins de l'essai, un détecteur de concentration d'hydrogène est installé là où l'hydrogène gazeux risque le plus de s'accumuler dans l'habitacle (par exemple à proximité du garnissage de pavillon) lorsqu'il s'agit de vérifier la conformité aux prescriptions du paragraphe 5.2.1.4.2, et des détecteurs de concentration d'hydrogène doivent être installés dans les volumes fermés ou semi-fermés sur le véhicule où l'hydrogène peut s'accumuler lors des évacuations de gaz simulées lorsqu'il s'agit 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 du véhicule, les fenêtres et autres ouvertures 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 la durée de l'essai.
- 6.1.3.2.2.3 On simule une fuite au moyen de la fonction de commande à distance.
- 6.1.3.2.2.4 On mesure la concentration d'hydrogène de façon continue jusqu'à ce qu'elle n'augmente plus pendant 3 min. Lorsqu'il s'agit de vérifier la conformité aux prescriptions du paragraphe 5.2.1.4.3, on augmente ensuite le débit de fuite simulée jusqu'à ce que la vanne d'arrêt principale se ferme et que le signal d'alarme soit actionné. Le contrôle du courant électrique alimentant la vanne d'arrêt ou le bruit émis par la fermeture de celle-ci permettent de confirmer qu'elle fonctionne bien.
- 6.1.3.2.2.5 Lorsqu'il s'agit de vérifier la conformité aux prescriptions du paragraphe 5.2.1.4.2, l'essai est réussi si la concentration d'hydrogène dans l'habitacle ne dépasse pas 1,0 %. Lorsqu'il s'agit de vérifier la conformité aux prescriptions du paragraphe 5.2.1.4.3, l'essai est réussi si le signal d'alarme et la fonction de fermeture s'actionnent aux niveaux (ou en dessous des niveaux) spécifiés au paragraphe 5.2.1.4.3; dans le cas contraire, l'essai est un échec et le système n'est pas qualifié pour être mis en service sur le véhicule.
- 6.1.4 Essai de conformité pour le système d'échappement du véhicule
- 6.1.4.1 On fait chauffer le moteur du véhicule d'essai (pile à combustible ou autre moteur) jusqu'à sa température normale de fonctionnement.
- 6.1.4.2 On porte l'appareil de mesure avant utilisation à sa température normale de fonctionnement.
- 6.1.4.3 On place la sonde de mesure de l'appareil de mesure au centre du flux de gaz d'échappement, à 100 mm au maximum de l'orifice de sortie du tuyau d'échappement.
- 6.1.4.4 On mesure la concentration d'hydrogène dans les gaz d'échappement de façon continue au cours des étapes suivantes:
- a) Arrêt du système moteur;
 - b) À la fin de la procédure d'arrêt, redémarrage immédiat du système moteur;
 - c) Après un délai d'une minute, nouvel arrêt du système moteur et poursuite des mesures jusqu'à la fin de la procédure d'arrêt.
- 6.1.4.5 Le temps de réponse de l'appareil de mesure doit être inférieur à 300 ms.
- 6.1.5 Essai de conformité pour la tuyauterie d'alimentation en carburant
- 6.1.5.1 On fait chauffer le système moteur du véhicule d'essai (pile à combustible ou autre 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 à l'endroit des joints.
- 6.1.5.4 Dans le cas de l'utilisation d'un détecteur de fuite de gaz, on actionne le détecteur durant 10 s au moins en des points situés aussi près que possible de la tuyauterie.
- 6.1.5.5 Dans le cas de l'utilisation d'un liquide de détection, l'observation s'effectue immédiatement après l'application du liquide. En outre, des contrôles visuels doivent avoir lieu quelques min après l'application pour détecter d'éventuelles bulles causées par des fuites.
- 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 pour les systèmes de stockage d'hydrogène comprimé sont formulées dans les sections suivantes:
Section 6.2.2: Procédures d'essai pour les caractéristiques mesurées de référence (voir le paragraphe 5.1.1);
Section 6.2.3: Procédures d'essai pour la durabilité des caractéristiques (voir le paragraphe 5.1.2);
Section 6.2.4: Procédures d'essai pour les caractéristiques prévues en utilisation routière (voir le paragraphe 5.1.3);
Section 6.2.5: Procédures d'essai pour l'exposition au feu (voir le paragraphe 5.1.4);
Section 6.2.6: Procédures d'essai pour la durabilité des caractéristiques des dispositifs de fermeture primaires (voir le paragraphe 5.1.5).
- 6.2.2 Procédures d'essai pour les caractéristiques mesurées de référence (voir le paragraphe 5.1.1)
- 6.2.2.1 Essai d'éclatement (hydraulique)
L'essai d'éclatement doit être effectué à la température de 20 (± 5)° C, à l'aide d'un liquide non corrosif. La vitesse de montée en pression doit être inférieure ou égale à 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 soit que le réservoir soit placé en série entre la source de pression et le dispositif de mesure de celle-ci, soit 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 (hydraulique)
Cet essai doit être conduit conformément à la procédure ci-après:
- a) On remplit le réservoir d'un liquide non corrosif;
 - b) Au début de l'essai, on porte le réservoir et le liquide à la température et à l'humidité relative spécifiées; le milieu ambiant, le liquide et le revêtement du réservoir doivent être maintenus à la température indiquée du début à la fin de l'essai. La température du réservoir peut toutefois s'écarter de la température ambiante durant l'essai;

- c) On soumet le réservoir à des cycles de pression variant entre 2 (\pm 1) MPa et la pression visée, à une cadence ne dépassant pas 10 cycles par minute pendant le nombre de cycles spécifié;
- d) La température du liquide hydraulique présent dans le réservoir est maintenue et contrôlée à la valeur spécifiée.

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

6.2.3.1 Essai de pression d'épreuve

Le réservoir est mis sous pression graduellement, avec un liquide hydraulique non corrosif, jusqu'à ce que la pression visée soit atteinte. Cette pression est alors maintenue pendant la durée spécifiée.

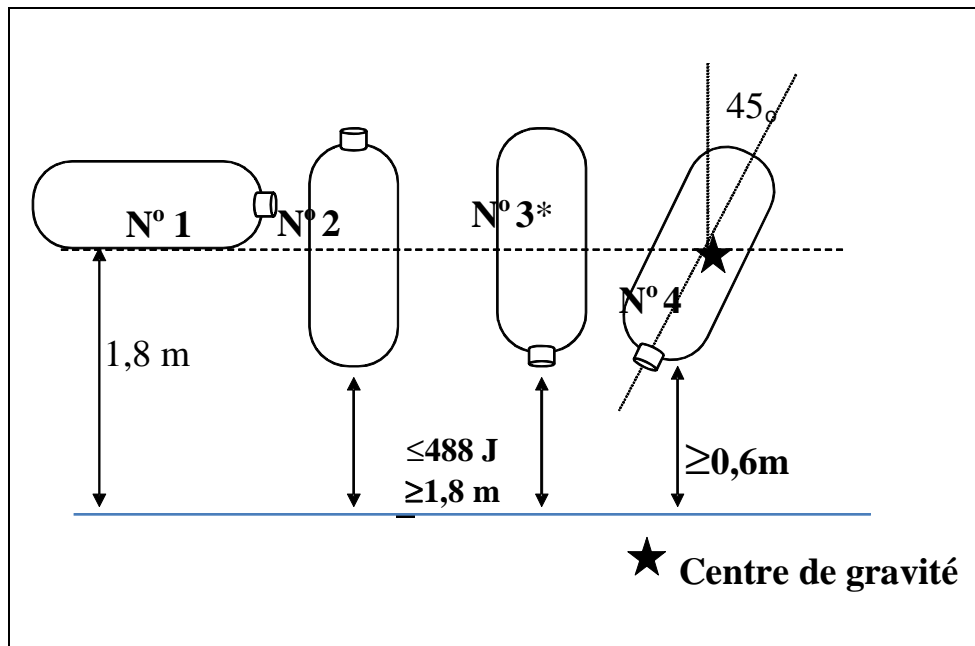
6.2.3.2 Essai de chute (choc) (sans pressurisation)

Le réservoir est soumis à l'essai de chute à la température ambiante, sans mise sous pression interne et sans soupapes montées. La surface sur laquelle les réservoirs chutent doit être une aire en béton horizontale et lisse ou une surface de dureté équivalente.

- a) L'orientation de chute des réservoirs soumis à l'essai (selon les prescriptions du paragraphe 5.1.2.2) est déterminée comme suit. Un ou plusieurs réservoirs supplémentaires doivent tomber selon chacune des orientations prescrites ci-après. Les chutes selon les différentes orientations peuvent être exécutées sur un seul réservoir, ou il peut être utilisé 4 réservoirs, chacun pour une orientation de chute;
 - i) Une chute depuis la position horizontale, le fond du réservoir se trouvant à 1,8 m au-dessus du sol;
 - ii) Une chute sur l'extrémité à partir de la position verticale, l'extrémité portant l'embase étant dirigée vers le haut, avec une énergie potentielle d'au moins 488 J, l'extrémité inférieure ne devant pas être située à plus de 1,8 m de hauteur au-dessus du sol;
 - iii) Une chute sur l'extrémité à partir de la position verticale, l'extrémité portant l'embase étant dirigée vers le bas, avec une énergie potentielle d'au moins 488 J, l'extrémité inférieure ne devant pas être située à plus de 1,8 m de hauteur au-dessus du sol. Dans le cas d'un réservoir symétrique (c'est-à-dire avec des embases aux 2 extrémités), cette orientation de chute n'est pas nécessaire;
 - iv) Une chute à 45° de la position verticale, l'extrémité portant l'embase étant dirigée vers le haut, le centre de gravité étant situé à 1,8 m au-dessus du sol. Toutefois, si le fond du réservoir est situé à moins de 0,6 m du sol, l'angle de chute doit être modifié pour respecter la hauteur minimale du fond de 0,6 m et celle du centre de gravité de 1,8 m par rapport au sol.

Les 4 orientations de chute sont illustrées ci-après.

Figure 5
Orientations de chute



Aucune mesure ne doit être prise pour empêcher les réservoirs de rebondir lors du choc. Par contre, des mesures peuvent être prises pour les empêcher de se renverser lors de l'essai de chute verticale décrit à l'alinéa *b* ci-dessus.

Si plusieurs réservoirs sont utilisés pour exécuter les essais selon les 4 orientations de chute, ils doivent être soumis à l'essai de cycles de pression prévu au paragraphe 6.2.2.2, jusqu'à ce qu'une fuite se produise ou que 22 000 cycles aient été exécutés sans fuite. Aucune fuite ne doit se produire avant que soit effectué le nombre de cycles prédéfini (5 500, 7 500 ou 11 000).

L'orientation du réservoir qui est soumis aux essais de chute conformément au paragraphe 5.1.2.2, est déterminée comme suit:

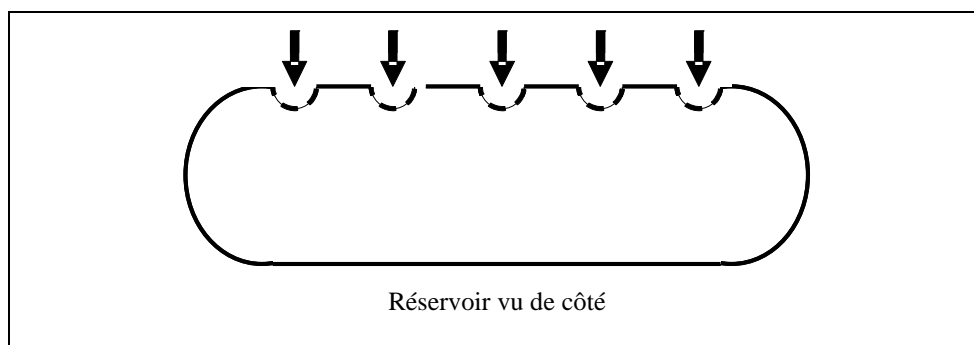
- a) Si un même réservoir a été soumis aux essais selon les 4 orientations de chute, le réservoir qui est soumis aux essais de chute conformément au paragraphe 5.1.2.2 doit subir les essais selon les 4 orientations de chute;
- b) Si plusieurs réservoirs sont utilisés pour exécuter les essais selon les 4 orientations de chute, et si tous les réservoirs subissent 22 000 cycles sans fuite, l'orientation de chute du réservoir qui est soumis aux essais de chute conformément au paragraphe 5.1.2.2 doit être celle à 45° (al. iv) et ce réservoir doit être ensuite soumis aux autres essais comme prescrit au paragraphe 5.1.2;
- c) Si plusieurs réservoirs sont utilisés pour exécuter les essais selon les 4 orientations de chute, et si l'un quelconque des réservoirs ne subit pas 22 000 cycles sans fuite, le nouveau réservoir doit être soumis à l'essai de chute selon l'orientation ayant abouti au plus faible nombre de cycles avant fuite, puis aux autres essais comme prescrit au paragraphe 5.1.2.

6.2.3.3 Essai d'altération de surface (sans pressurisation)

Cet essai se déroule comme suit:

- a) Entaillage de la surface: Deux entailles longitudinales sont pratiquées à la scie sur la paroi externe inférieure du réservoir placé à l'horizontale et non pressurisé, le long de la partie cylindrique située à proximité de l'arrondi mais non pas dans cette zone. La première entaille doit avoir une profondeur de 1,25 mm et une longueur de 25 mm au moins en direction de l'extrémité du réservoir portant la soupape. La seconde doit avoir une profondeur de 0,75 mm et une longueur de 200 mm au moins en direction de l'extrémité opposée;
- b) Choc au pendule: La partie supérieure du réservoir placé à l'horizontale doit être divisée en 5 zones distinctes (qui ne se chevauchent pas) d'un diamètre de 100 mm chacune (voir la figure 6). Après 12 h de préconditionnement à -40°C dans une enceinte à atmosphère contrôlée, on percute le centre de chaque zone au moyen d'un pendule de la forme d'une pyramide ayant des faces triangulaires équilatérales et une 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 5 zones du réservoir doit être égale à 30 j. Lors des chocs, le réservoir doit être maintenu fermement en place et ne doit pas être sous pression.

Figure 6
Réservoir vu de côté



6.2.3.4 Essai d'exposition aux agents chimiques et essai de cycles de pression à température ambiante

Chacune des 5 zones du réservoir non pressurisé préconditionnées par le choc du pendule (par. 6.4.2.5.2) est exposée à l'une des 5 solutions ci-après:

- a) Acide sulfurique (acide de batteries) – solution à 19 % en volume dans l'eau;
- b) Hydroxyde de sodium – solution à 25 % en poids dans l'eau;
- c) Mélange méthanol/essence (disponible dans les stations de ravitaillement) – en concentrations respectives de 5/95 %;
- d) Nitrate d'ammonium – solution à 28 % en poids dans l'eau (urée);
- e) Liquide lave-glace – solution à 50 % en volume d'alcool méthylique et d'eau.

Le réservoir soumis à l'essai doit être mis en place de manière que les zones d'exposition au liquide d'essai soient situées au sommet. Un tampon de laine de verre d'environ 0,5 mm d'épaisseur et 100 mm de diamètre est posé sur chacune des 5 zones préconditionnées. Du liquide d'essai est versé sur la laine de verre en quantité suffisante pour que le tampon soit mouillé de manière régulière sur toute sa surface et dans toute son épaisseur pendant la durée de l'essai.

Le réservoir est maintenu dans cet état d'exposition durant 48 h, à une pression correspondant à 125 % de la PSN (appliquée hydrauliquement) et à une température de 20 (± 5) °C, avant d'être soumis à d'autres essais.

L'essai de cycles de pression est conduit aux pressions indiquées selon le paragraphe 6.2.2.2, à une température de 20 (± 5) °C et pendant le nombre de cycles spécifié. Ensuite, on retire les tampons de laine de verre et on rince la surface du réservoir à l'eau avant d'exécuter les 10 derniers cycles de pression à la pression finale spécifiée.

6.2.3.5 Essai de pression statique (hydraulique)

Le réservoir est mis à la pression spécifiée dans une enceinte à température contrôlée. L'enceinte et le liquide d'essai non corrosif sont maintenus à la température spécifiée, à ± 5 °C près, pendant la durée indiquée.

6.2.4 Procédures d'essai pour les caractéristiques prévues en utilisation routière (par. 5.1.3)

(On trouvera ci-après les procédures s'appliquant aux essais pneumatiques; en ce qui concerne les essais hydrauliques, voir le paragraphe 6.3.2.)

6.2.4.1 Essai de cycles de pression de gaz (pneumatique)

Au début de l'essai, on stabilise le système de stockage à la température, à l'humidité relative et au niveau de carburant spécifiés pendant 24 h au moins. La température et l'humidité relative prescrites sont maintenues dans l'environnement d'essai pendant tout le reste de l'essai (lorsque cela est prévu dans les spécifications de l'essai, la température du système est stabilisée à la température externe entre les cycles de pression). Le système de stockage est soumis à des cycles de pression comprise entre moins de 2 (+0/-1) MPa et la pression maximale indiquée (± 1 MPa). Si des fonctions de régulation du système qui sont actives lorsque le véhicule est en service permettent d'empêcher la pression de tomber en dessous d'une pression spécifiée, cette condition doit être respectée durant les cycles de pression. La vitesse de remplissage est contrôlée de façon à suivre un taux constant d'accroissement de la pression sur 3 min, sans toutefois que le débit dépasse 60 g/s; la température de l'hydrogène introduit dans le réservoir est maintenue à la valeur indiquée. Cependant, si la température du gaz dans le réservoir dépasse 85° C, le taux constant d'accroissement de la pression devrait être réduit. La vitesse de vidage est fixée à une valeur supérieure ou égale à la demande de carburant instantanée maximale du véhicule prévue. Les cycles de pression sont appliqués selon le nombre indiqué. Si des dispositifs ou des fonctions sont prévus afin de prévenir une température interne extrême, il est possible d'exécuter l'essai avec ceux-ci (ou avec des instruments ayant une fonction équivalente).

6.2.4.2 Essai de perméation du gaz (pneumatique)

Un système de stockage est rempli entièrement avec de l'hydrogène gazeux à 115 % de la PSN (une pleine densité de remplissage équivalant à 100 % de la PSN à 15 °C correspond à 113 % de la PSN à 55 °C) et maintenu ≥ 55 °C dans une enceinte hermétique jusqu'à perméation en conditions stabilisées mais au minimum pendant 30 h. On peut ainsi mesurer le taux de perte total par fuite et perméation en conditions stabilisées pour le système de stockage.

6.2.4.3 Essai de fuite localisée (pneumatique)

Pour exécuter cet essai, on peut effectuer un essai par détection de bulles. La procédure est alors la suivante:

- a) L'orifice d'évacuation de la vanne d'arrêt (et d'autres raccords internes au système) doit être recouvert d'un capot (l'essai consistant à rechercher une fuite externe).

Au choix du technicien exécutant l'essai, le spécimen d'essai peut être immergé dans le liquide servant à détecter une fuite, ou le liquide peut être appliqué sur le spécimen placé à l'air libre. La taille des bulles produites peut être très variable selon les conditions. L'estimation de l'ampleur de la fuite s'effectue en fonction de la taille des bulles et du débit.

- b) *Remarque:* Pour un débit localisé de 0,005 mg/s (3,6 Nml/min), le taux résultant admissible de production de bulles est d'environ 2 030 bulles par minute pour une taille de bulle typique de 1,5 mm de diamètre. Même avec des bulles beaucoup plus grandes, la fuite doit être aisément détectable. Pour des bulles de 6 mm de diamètre, c'est-à-dire exceptionnellement grandes, le taux admissible serait d'environ 32 bulles par minute.

6.2.5 Procédures d'essai pour l'exposition au feu justifiant le retrait du service (par. 5.1.4)

6.2.5.1 Essai d'exposition au feu

L'ensemble réservoir(s)/accessoires comprend le système de stockage d'hydrogène comprimé, ainsi que d'autres éléments appropriés, notamment le système d'évacuation (le tuyau d'évacuation et son capot, par exemple) et toutes les protections placées directement sur le(s) réservoir(s) (isolants thermiques enroulés sur le réservoir et/ou couvercles ou protections sur le ou les dispositifs de décompression thermocommandés (TPRD)).

L'une ou l'autre des 2 méthodes ci-après permet de déterminer la position du système par rapport à la source initiale (localisée) des flammes:

6.2.5.1.1 Méthode 1: Qualification pour une installation générique (non spécifique) sur un véhicule

Si l'installation sur un véhicule n'est pas spécifiée et si la qualification n'est pas limitée à une installation spécifique sur un véhicule, la zone d'exposition localisée au feu est la zone du spécimen d'essai qui est la plus éloignée du ou des TPRD. Comme indiqué précédemment, le spécimen d'essai doit uniquement comprendre les éléments isolants thermiques ou autres protections fixés directement au réservoir et utilisés pour toutes les applications sur des véhicules. Le ou les systèmes d'évacuation (le tuyau

d'évacuation et son couvercle, par exemple) et/ou les couvercles ou protections sur le ou les dispositifs de décompression thermocommandés (TPRD) sont inclus dans l'ensemble réservoir(s)/accessoires s'il est prévu de les utiliser pour telle ou telle application. Si un système est essayé sans les éléments qui lui sont associés, il doit être soumis à un nouvel essai lorsqu'une application particulière nécessite l'utilisation desdits éléments.

6.2.5.1.2 Méthode 2: Qualification pour une installation spécifique sur un véhicule

S'il est prévu une installation spécifique sur le véhicule et si la qualification du système est limitée à cette installation, on peut introduire dans le montage d'essai d'autres éléments en plus du système de stockage de l'hydrogène. Ces éléments (tels que les écrans de protection ou couvercles, qui sont fixés de façon permanente à la structure du véhicule par soudage ou boulonnage, et non pas fixés au système de stockage) doivent être inclus dans le montage d'essai de l'installation prévue sur le véhicule pour le système de stockage. Les zones d'exposition localisée au feu retenues pour l'essai d'exposition sont celles qui correspondent aux hypothèses les plus défavorables en fonction des 4 orientations possibles du feu, à savoir un feu provenant de l'habitacle, du compartiment de chargement ou à bagages, des passages de roues ou d'une flaque d'essence au sol.

Dans le cas d'un feu enveloppant, le réservoir peut y être exposé sans aucune protection, comme décrit au paragraphe 6.2.5.2.

Les prescriptions d'essai ci-après sont applicables aux 2 méthodes ci-dessus:

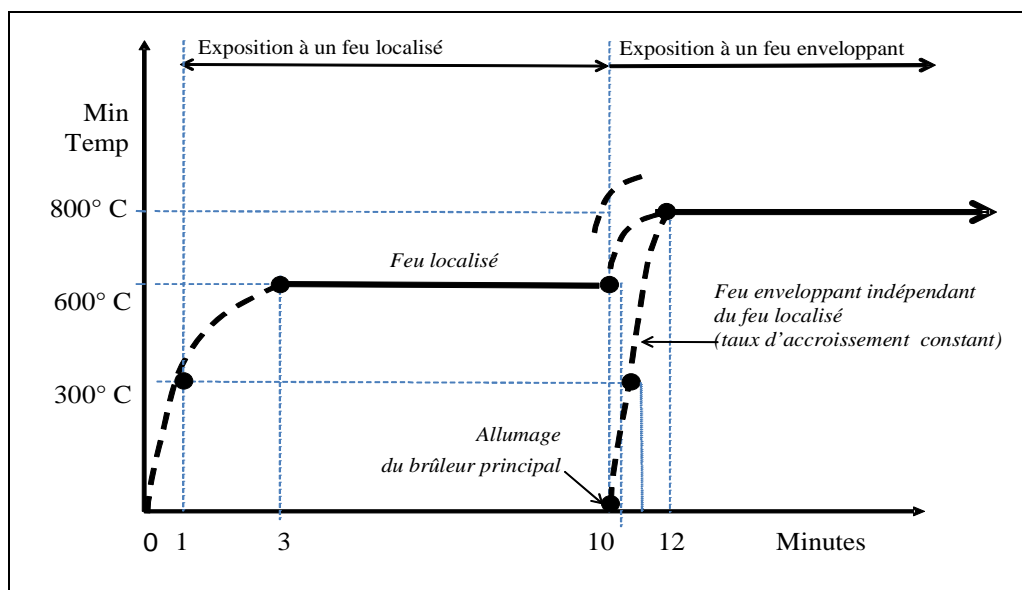
- a) L'ensemble réservoir(s)/accessoires est rempli d'hydrogène comprimé à 100 % de la PSN. Il est placé à l'horizontale, à 100 mm environ au-dessus de la source des flammes (Note: comme il est dit au paragraphe 5.1.4, les Parties contractantes à l'Accord de 1998 peuvent choisir d'utiliser de l'air comprimé comme gaz d'essai alternatif aux fins de l'homologation du réservoir en vue de son utilisation uniquement dans le pays ou la région concerné);

Essai d'exposition au feu – feu localisé

- b) Sur le spécimen d'essai, la zone d'exposition localisée au feu est située le plus loin possible du ou des dispositifs de décompression thermocommandés (TPRD). En cas d'application de la méthode 2, si l'on identifie des zones plus vulnérables pour une installation spécifique, la zone plus vulnérable la plus éloignée du ou des dispositifs de décompression thermocommandés est placée directement au-dessus du foyer;
- c) Le foyer est constitué par un ensemble de brûleurs à gaz GPL disposés de façon à chauffer le spécimen d'essai à une température minimale uniforme. La température est mesurée à l'aide de 5 thermocouples au moins couvrant la longueur du spécimen d'essai jusqu'à 1,65 m au maximum (2 thermocouples au moins se trouvant dans la zone d'exposition localisée au feu et 3 autres au moins étant régulièrement espacés et situés à 0,5 m au plus dans la zone restante), placés à $25 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$ de la surface extérieure du spécimen, sur son axe longitudinal. S'il le souhaite, le fabricant ou le laboratoire d'essais peut placer d'autres thermocouples aux points de détection du dispositif de décompression thermocommandé ou en d'autres points en vue d'obtenir des informations de diagnostic;

- d) Pour assurer un chauffage uniforme, on utilise des pare-vent;
- e) Les flammes prennent naissance dans un foyer long de 250 ± 50 mm, situé sous la zone d'exposition localisée du spécimen d'essai. Elles s'étendent sur toute la largeur du système de stockage. En cas d'application de la méthode 2, il est possible de réduire la hauteur et la largeur des flammes afin de tenir compte des caractéristiques de l'installation sur le véhicule spécifique;
- f) Comme le montre la figure 7, la température des thermocouples situés dans la zone d'exposition localisée monte continuellement jusqu'à 300°C au moins dans la min suivant l'allumage et jusqu'à 600°C au moins dans les 3 min suivant l'allumage, et elle se maintient à ce niveau au moins durant les 7 min suivantes. Durant cette période, la température dans la zone d'exposition localisée ne doit pas dépasser 900°C . La conformité avec les prescriptions thermiques doit être respectée à compter d'une minute après le début de la période. Elle est établie sur la base des limites minimale et maximale et d'une moyenne mobile sur une minute pour chaque thermocouple dans la zone considérée (Note: la température en-dehors de la zone de la source initiale des flammes n'est pas précisée durant les 10 premières min suivant l'allumage).

Figure 7
Graphique de température pour l'essai d'exposition au feu



Essai d'exposition au feu – feu enveloppant

Au cours des 2 min qui suivent, la température de toute la surface extérieure de l'échantillon doit monter à 800°C au moins et les brûleurs doivent être réglés de façon à obtenir une température uniforme sur toute la longueur (jusqu'à 1,65 m) et toute la largeur du spécimen (immersion dans les flammes). La température minimale est maintenue à 800°C , tandis que la température maximale ne doit pas dépasser 1100°C . La conformité avec les prescriptions thermiques doit être respectée à compter de 1 min après le début de la période. Elle est établie sur la base des limites minimale et maximale constantes et d'une moyenne mobile sur 1 min pour chaque thermocouple.

Le spécimen d'essai est maintenu à température (dans les conditions d'immersion dans les flammes) jusqu'à ce qu'il y ait actionnement des dispositifs de décompression actionnés par la chaleur et que la pression tombe à moins de 1 MPa. L'évacuation des gaz doit être continue et le système de stockage ne doit pas éclater. Il ne doit pas se produire de dégagement de gaz supplémentaire par fuite (et non par décompression par les dispositifs) produisant une flamme de plus de 0,5 m au-delà du périmètre des flammes du foyer.

Tableau 2

Résumé de la procédure de l'essai d'exposition au feu

	<i>Exposition à un feu localisé</i>	<i>Durée</i>	<i>Exposition à un feu enveloppant (indépendant du feu localisé)</i>
À faire	Allumer les brûleurs	0-1 ^{re} min	Sans brûleur
Température minimum	Non précisé		Non précisé
Température maximum	<900 °C		Non précisé
À faire	Augmenter la température et stabiliser le feu pour une exposition localisée	1 ^{re} -3 ^e min	Sans brûleur
Température minimum	>300 °C		Non précisé
Température maximum	<900 °C		Non précisé
À faire	Poursuite de l'exposition à un feu localisé		Sans brûleur
Température minimum	1 min glissante en moyenne >600 °C		Non précisé
Température maximum	1 min glissante en moyenne <900 °C	3 ^e -10 ^e min	Non précisé
À faire	Augmenter la température		Allumage du brûleur principal à la 10 ^e min
Température minimum	1 min glissante en moyenne >600 °C		Non précisé
Température maximum	1 min glissante en moyenne <1 100 °C	10 ^e -11 ^e min	<1 100 °C
À faire	Augmenter la température et stabiliser le feu pour une exposition à un feu enveloppant		Augmenter la température et stabiliser le feu afin d'obtenir une exposition à un feu enveloppant
Température minimum	1 min glissante en moyenne >600 °C		>300 °C
Température maximum	1 min glissante en moyenne >1 100 °C	11 ^e -12 ^e min	<1 100 °C
À faire	Poursuite de l'exposition à un feu enveloppant		Poursuite de l'exposition à un feu enveloppant
Température minimum	1 min glissante en moyenne >800 °C		1 min glissante en moyenne >800 °C
Température maximum	1 min glissante en moyenne <1 100 °C	12 ^e min – fin de l'essai	1 min glissante en moyenne <1 100 °C

Consignation des résultats de l'essai d'exposition au feu

Les conditions de l'exposition au feu doivent être consignées avec suffisamment de détails pour qu'il soit possible de reproduire le taux d'apport thermique au spécimen d'essai. Les résultats enregistrés doivent inclure le temps qui s'écoule entre l'allumage du feu et l'instant d'actionnement des dispositifs de décompression actionnés par la chaleur, ainsi que la pression maximale et la durée de la phase d'évacuation nécessaire pour réduire la pression à moins de 1 MPa. Au cours de l'essai, les températures des thermocouples et la pression dans le réservoir sont enregistrées toutes les 10 s au moins. Si la température minimale prescrite n'a pu être maintenue sur la base des moyennes mobiles sur 1 min, l'essai est considéré comme nul. Si la température maximale prescrite n'a pu être maintenue sur la même base, l'essai est considéré comme nul uniquement en cas de défaillance du spécimen d'essai durant l'essai.

6.2.5.2 Feu enveloppant – conditions de l'essai:

L'objet soumis à l'essai est le système de stockage d'hydrogène comprimé. Celui-ci est rempli d'hydrogène comprimé à 100 % de la PSN. Le réservoir est placé à l'horizontale, son fond se trouvant à 100 mm environ au-dessus du foyer. Des protections en métal empêchent les flammes de toucher directement les vannes, les raccords ou les dispositifs de décompression du réservoir mais elles ne doivent pas être en contact direct avec ces éléments.

Des flammes uniformément réparties sur une longueur de 1,65 m doivent atteindre directement la surface du réservoir sur toute sa largeur. L'essai doit se poursuivre jusqu'à ce qu'il y ait évacuation complète (c'est-à-dire jusqu'à ce que la pression dans le réservoir soit tombée à moins de 0,7 MPa (100 psi)). Toute défaillance des brûleurs ou défaut d'uniformité du chauffage durant l'essai invalide les résultats.

La température des flammes doit être contrôlée au moyen de 3 thermocouples au moins, suspendus dans les flammes à environ 25 mm en dessous du fond du réservoir. Les thermocouples peuvent être fixés à des cubes d'acier de 25 mm de côté au maximum. La température des thermocouples et la pression du réservoir doivent être enregistrées toutes les 30 s durant l'essai.

Dans les 5 min qui suivent l'allumage du feu, une température moyenne des flammes d'au moins 590 °C (selon la moyenne de mesure obtenue avec les 2 thermocouples enregistrant les températures les plus élevées sur une période de 60 s) doit être atteinte. Cette température est ensuite maintenue durant tout l'essai.

Si le réservoir a une longueur inférieure à 1,65 m, le centre doit être placé au-dessus du centre du foyer. S'il a une longueur supérieure à 1,65 m et s'il est équipé d'un dispositif de décompression placé à l'une de ses extrémités, le feu doit être allumé à l'autre extrémité. S'il fait plus de 1,65 m en longueur et s'il est doté d'un dispositif de décompression à chaque extrémité, ou à plusieurs endroits sur sa longueur, le foyer doit être centré entre les dispositifs de décompression qui sont les plus distants horizontalement.

Les gaz du réservoir doivent être évacués par les dispositifs de décompression et le réservoir ne doit pas éclater.

- 6.2.6 Procédures d'essai pour la durabilité des caractéristiques des dispositifs de fermeture primaires (voir par. 5.1.5)
- 6.2.6.1 Essais de qualification des dispositifs de décompression actionnés par la chaleur du système de stockage d'hydrogène comprimé
- Les essais doivent être réalisés avec du gaz hydrogène répondant aux normes ISO 14687 et 2/SAE J2719. Ils doivent tous se dérouler à la température ambiante de 20 (± 5) °C, sauf indication contraire. Les essais à exécuter en vue de la qualification des dispositifs de décompression actionnés par la chaleur sont les suivants:
- 6.2.6.1.1 Essai de cycles de pression
- 5 dispositifs de décompression actionnés par la chaleur sont soumis à 11 000 cycles de pression interne avec un gaz hydrogène répondant aux normes de qualité ISO 14687-2 et SAE J2719. Les 5 premiers cycles sont exécutés entre moins de 2 (± 1) MPa et 150 % de la PSN (± 1 MPa), et les cycles restants entre 2 (± 1) MPa et 125 % de la PSN (± 1 MPa). Les 1 500 premiers cycles sont exécutés à une température des dispositifs de décompression actionnés par la chaleur de 85 °C ou plus et les cycles restants à la température de 55 (± 5) °C. Le rythme maximal des cycles est de 10 cycles par minute. À la suite de cet essai, les dispositifs de décompression (T/PRD) doivent satisfaire aux prescriptions de l'essai d'étanchéité (voir par. 6.2.6.1.8), de l'essai de débit (voir par. 6.2.6.1.10) et de l'essai d'actionnement en atelier (voir par. 6.2.6.1.9).
- 6.2.6.1.2 Essai de vie accéléré
- 8 dispositifs de décompression actionnés par la chaleur sont mis à l'essai: 3 à la température d'actionnement indiquée par le fabricant, Tact, et 5 à une température d'essai de vie accéléré, Tlife = 9,1 x Tact^{0,503}. Le dispositif est placé dans un four ou dans un bain de liquide et maintenu à une température constante (± 1 °C). La pression d'hydrogène à l'entrée des dispositifs doit être de 125 % de la PSN (± 1 MPa). La source de pression peut se trouver à l'extérieur du four ou du bain à température contrôlée. Chaque dispositif est mis sous pression individuellement ou au moyen d'une rampe. Dans le cas de l'utilisation d'une rampe, chaque branchement doit comporter une soupape antiretour de façon à éviter une dépressurisation de l'ensemble lorsqu'un élément est défaillant. Les 3 dispositifs essayés à la température Tact doivent s'actionner dans un délai inférieur à 10 h. Les 5 dispositifs essayés à la température Tlife ne doivent pas s'actionner avant 500 h.
- 6.2.6.1.3 Essai de cycles de température
- Un dispositif non sous pression est placé dans un bain de liquide maintenu à -40 °C au minimum durant 2 h au moins. Il est ensuite transféré dans un bain de liquide à 85 °C au minimum en moins de 5 min, puis maintenu à cette température pendant 2 h au moins. Ensuite, il est transféré dans un bain de liquide à -40 °C au minimum en moins de 5 min;
 - L'étape a) est répétée de façon à exécuter 15 cycles thermiques;
 - Après avoir été conditionné pendant 2 h au moins dans le bain de liquide à -40 °C au minimum, le dispositif doit être soumis à des cycles de pression interne d'hydrogène variant de moins de 2 MPa (+1/-0 MPa) à 80 % de la PSN (+2/-0 MPa) durant 100 cycles, tandis que le bain est maintenu à la température de -40 °C au minimum;

- d) À la suite des cycles de variation de température et de pression, le dispositif de décompression doit satisfaire aux prescriptions indiquées pour l'essai d'étanchéité (voir par. 6.2.6.1.8), qui doit être exécuté à -40 °C ($+5/-0\text{ °C}$). Ensuite, le TPRD doit satisfaire aux prescriptions de l'essai d'actionnement en atelier (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 par le sel

2 dispositifs de décompression actionnés par la chaleur sont mis à l'essai. Les éventuels bouchons non permanents placés à la sortie des dispositifs sont enlevés. Chaque dispositif est installé dans l'appareillage d'essai conformément aux recommandations du fabricant, de sorte que ses conditions d'exposition soient comparables à celles d'une exposition réelle. Chaque dispositif est ensuite exposé pendant 500 h à un brouillard salin conformément à la norme ASTM B117 (Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus). Toutefois, pour le premier dispositif, le pH de la solution saline doit être réglé à $4,0 \pm 0,2$ par addition d'acide sulfurique et d'acide nitrique dans la proportion de 2:1 et pour le second, à $10,0 \pm 0,2$ par addition d'hydroxyde de sodium. La température dans la chambre de brumisation est maintenue à $30-35\text{ °C}$.

À la suite de cet essai, chaque dispositif de décompression doit satisfaire aux prescriptions indiquées pour l'essai d'étanchéité (voir par. 6.2.6.1.8), l'essai de débit (voir par. 6.2.6.1.10) et l'essai d'actionnement en atelier (voir par. 6.2.6.1.9).

6.2.6.1.5 Essai d'exposition aux agents chimiques de l'environnement automobile

On évalue la résistance à la dégradation par exposition externe aux liquides présents sur le véhicule en exécutant l'essai ci-après:

- a) Les orifices d'entrée et de sortie du dispositif de décompression actionné par la chaleur doivent être raccordés ou obturés conformément aux instructions du fabricant. La surface extérieure du dispositif de décompression doit être exposée durant 24 h à chacun des liquides ci-après, à la température de $20 (\pm 5)\text{ °C}$:
- i) Acide sulfurique – solution à 19 % en volume dans l'eau;
 - ii) Hydroxyde de sodium – solution à 25 % en poids dans l'eau;
 - iii) Nitrate d'ammonium – solution à 28 % en poids dans l'eau;
 - iv) Liquide lave-glace (solution à 50 % en volume d'alcool méthylique et d'eau).

On complète au besoin la quantité de liquide utilisée, de sorte que l'exposition soit intégrale pendant la durée de l'essai. Chaque liquide fait l'objet d'un essai distinct. Un même dispositif de décompression peut être exposé successivement à tous les liquides;

- b) Après avoir été exposé à chacun des liquides, le dispositif de décompression est essuyé et rincé à l'eau;
- c) Le dispositif de décompression ne doit montrer aucun signe de dégradation physique qui pourrait nuire à son fonctionnement, comme des fissures, un ramollissement ou des boursouffures; les altérations superficielles telles que les piqûres ou les taches ne sont pas prises en considération. À la suite de cet essai, le dispositif de décompression

doit satisfaire aux prescriptions indiquées pour l'essai d'étanchéité (voir par. 6.2.6.1.8), l'essai de débit (voir par. 6.2.6.1.10) et l'essai d'actionnement en atelier (voir par. 6.2.6.1.9).

6.2.6.1.6 Essai de rupture par corrosion sous tension

Dans le cas des dispositifs de décompression actionnés par la chaleur contenant des organes constitués d'alliages à base de cuivre (par exemple laiton), seul un exemplaire est soumis aux essais. Tous ses organes faits en alliage de cuivre qui sont en contact avec l'atmosphère sont dégraissés puis exposés en continu pendant 10 jours à un brouillard d'ammoniac contenu dans une chambre en verre fermée par un couvercle en verre.

De l'ammoniac d'une densité relative de 0,94 est placé au fond de la chambre en verre, sous l'échantillon, à une concentration d'au moins 20 ml par litre de volume du récipient. L'échantillon est placé à 35 (± 5) mm au-dessus de la solution 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 organes constitués en alliage à base de cuivre ne doivent présenter ni fissure ni décollement pendant l'essai.

6.2.6.1.7 Essai de chute et de vibrations

- a) 6 dispositifs de décompression actionnés par la chaleur sont lâchés d'une hauteur de 2 m, à température ambiante (20 ± 5 °C), sur un sol en béton lisse, sur lequel ils peuvent rebondir. Chaque échantillon est lâché dans 6 directions différentes (selon les 3 axes orthogonaux, à savoir l'axe vertical, l'axe latéral et l'axe longitudinal, et dans les 2 sens). Si aucun des 6 échantillons ne présente de signe extérieur visible de détérioration qui le rendrait impropre à l'usage, ils sont soumis aux essais mentionnés sous b);
- b) Les 6 échantillons soumis à l'essai de chute mentionné sous a) 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 le long de chacun des 3 axes orthogonaux, à savoir l'axe vertical, l'axe latéral et l'axe longitudinal, à la fréquence de résonance la plus forte sur chaque axe. Cette fréquence est obtenue par une accélération de 1,5 g et un balayage sur une plage de fréquences sinusoïdales comprises entre 10 et 500 Hz, pendant 10 min. La fréquence de résonance se reconnaît à une augmentation marquée de l'amplitude des vibrations. Si la fréquence de résonance n'est pas obtenue dans cette gamme, l'essai est effectué à une fréquence de 40 Hz. Après cet essai, aucun des échantillons ne doit présenter de signe extérieur visible qui le rendrait impropre à l'usage. Les échantillons doivent ensuite satisfaire aux prescriptions de l'essai de fuite (par. 6.2.6.1.8), l'essai de débit (par. 6.2.6.1.10) et l'essai d'actionnement au banc (par. 6.2.6.1.9).

6.2.6.1.8 Essai de fuite

Un TPRD qui n'a pas encore subi d'essai est soumis à des essais à température ambiante, à haute température et à basse température, sans être soumis à d'autres essais de qualification. L'échantillon est maintenu pendant 1 heure à chacune des températures et pressions d'essai avant l'essai. Les essais se déroulent comme suit:

- a) Essai à température ambiante: conditionner l'échantillon à $20 (\pm 5) ^\circ\text{C}$, puis le soumettre à une pression égale à 5 % (+0/-2 MPa) et 150 % de la PSN (+2/-0 MPa);
- b) Essai à haute température: conditionner l'échantillon à une température minimum de $85 ^\circ\text{C}$, puis le soumettre à une pression égale à 5 % (+0/-2 MPa) et 150 % de la PSN (+2/-0 MPa);
- c) Essai à basse température: conditionner l'échantillon à une température minimum de $-40 ^\circ\text{C}$, puis le soumettre à une pression égale à 5 % (+0/-2 MPa) et 100 % de la PSN (+2/-0 MPa).

D'autres échantillons sont soumis à des essais de fuite conformément aux dispositions du paragraphe 6.2.6.1 et exposés sans interruption à la température fixée dans les essais en question.

À toutes les températures fixées pour les essais, l'échantillon est conditionné pendant 1 min par immersion dans un fluide dont la température est contrôlée (ou par une méthode équivalente). Si aucune bulle n'apparaît pendant le délai prévu, l'essai est considéré comme réussi. En revanche, si des bulles apparaissent, le taux de fuite est mesuré selon une méthode appropriée. La fuite totale d'hydrogène doit être inférieure à 10 Nml/h.

6.2.6.1.9 Essai d'actionnement au banc

2 autres TPRD sont soumis à cet essai sans avoir été soumis à d'autres essais de qualification, afin d'établir un délai d'actionnement de référence. D'autres échantillons préessayés (conformément aux paragraphes 6.2.6.1.1, 6.2.6.1.3, 6.2.6.1.4, 6.2.6.1.5 ou 6.2.6.1.7) sont soumis aux essais d'actionnement au banc comme indiqué dans les autres essais visés au paragraphe 6.2.6.1:

- a) Le montage d'essai se compose soit d'un four soit d'une cheminée capable de réguler le flux d'air de façon à obtenir une température de $600 (\pm 10) ^\circ\text{C}$ dans l'air entourant le dispositif de décompression. L'échantillon n'est pas exposé directement à la flamme. Il est placé dans un montage d'essai conformément aux instructions de pose du fabricant et la configuration d'essai doit être indiquée;
- b) Un thermocouple est placé dans le four ou la cheminée pour surveiller la température, qui doit rester dans une fourchette acceptable pendant 2 min avant le début de l'essai;
- c) Le dispositif de décompression pressurisé est placé dans le four ou la cheminée et le temps qu'il met à s'actionner est enregistré. Avant d'être placé dans le four ou la cheminée, un nouvel échantillon (non préessayé) est soumis à une pression ne dépassant pas 25 % de la PSN et un autre échantillon (non préessayé) est soumis à une pression égale à la PSN;

- d) Les dispositifs de décompression actionnés par la chaleur précédemment soumis aux autres essais du paragraphe 6.2.6.1 doivent s'actionner dans un laps de temps qui ne dépasse pas de plus de 2 min le délai d'actionnement de l'échantillon pressurisé au maximum à 25 % de la PSN;
- e) Les délais d'actionnement des 2 échantillons n'ayant pas subi l'essai précédent ne doivent pas différer de plus de 2 min.

6.2.6.1.10 Essai de débit

- a) 8 dispositifs de décompression actionnés par la chaleur sont soumis à des essais de débit, dont 3 nouveaux échantillons plus 5 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;
- b) Chaque échantillon est actionné conformément aux dispositions du paragraphe 6.2.6.1.9. Après avoir été actionné, chaque échantillon, sans aucun nettoyage, démontage ni reconditionnement, est soumis à l'essai de débit, à l'aide d'hydrogène, d'air ou d'un gaz inerte;
- c) L'essai de débit est effectué à une pression d'entrée de 2 (\pm 0,5) MPa, à température ambiante. La température et la pression d'entrée sont enregistrées;
- d) Le débit est mesuré avec une exactitude de \pm 2 %. La valeur la plus basse enregistrée doit être égale à au moins 90 % de la valeur la plus haute.

6.2.6.2 Essai de qualification de soupapes antiretour et de vannes d'arrêt pour systèmes de stockage d'hydrogène comprimé

Les essais doivent être effectués avec de l'hydrogène gazeux conforme aux normes ISO 14687-2 et SAE J2719, à une température ambiante de 20 (\pm 5) °C, sauf indication contraire. Les essais de qualification de la soupape antiretour et de la vanne d'arrêt sont définis comme indiqué ci-dessous:

6.2.6.2.1 Essai de résistance hydrostatique

La sortie de la soupape est obturée et ses organes internes sont bloqués en position ouverte. Un échantillon est soumis aux essais sans avoir été soumis à d'autres essais de qualification afin de définir une pression d'éclatement de référence, alors que les autres échantillons sont soumis aux essais ultérieurs définis dans le paragraphe 6.2.6.2.

- a) Une pression hydrostatique égale à 250 % de la PSN (+2/-0 MPa) est appliquée à l'entrée de la soupape pendant 3 min. Après quoi le composant est examiné pour s'assurer qu'aucune rupture ne s'est produite;
- b) La pression hydrostatique est ensuite accrue au rythme maximum de 1,4 MPa/s jusqu'à défaillance du composant et la pression hydrostatique appliquée à cet instant est enregistrée. La pression de défaillance des échantillons ayant précédemment été soumis aux essais doit être égale à au moins 80 % de la pression de défaillance de référence, sauf si la pression hydrostatique mesurée est supérieure à 400 % de la PSN.

6.2.6.2.2 Essai de fuite

Un échantillon n'ayant pas subi l'essai précédent est soumis à cet essai, à 3 régimes de température sans avoir été soumis au préalable à d'autres essais de qualification. Les 3 régimes de température sont les suivants:

- a) Température ambiante: l'échantillon est conditionné à $20 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ et il est soumis à une pression égale à 5 % (+0/-2 MPa) puis à 150 % de la PSN (+2/-0 MPa);
- b) Haute température: l'échantillon est conditionné à $85 ^\circ\text{C}$ au minimum et il est soumis à une pression égale à 5 % (+0/-2 MPa) puis à 150 % de la PSN (+2/-0 MPa);
- c) Basse température: l'échantillon est conditionné à $-40 ^\circ\text{C}$ au minimum et il est soumis à une pression égale à 5 % (+0/-2 MPa) puis à 100 % de la PSN (+2/-0 MPa).

D'autres échantillons sont soumis à l'essai de fuite conformément aux autres essais du paragraphe 6.2.6.2, tout en étant exposés en continu aux températures prévues dans les essais en question.

La sortie de la soupape est obturée au moyen d'un raccord borgne et de l'hydrogène sous pression est appliqué à l'entrée. À toutes les températures d'essai prescrites, l'échantillon est conditionné pendant 1 min par immersion dans un fluide à température contrôlée (ou selon une méthode équivalente). Si aucune bulle n'est observée pendant la période de temps prescrite, l'échantillon a subi l'essai avec succès. Au contraire, si des bulles apparaissent, le taux de fuite est mesuré au moyen d'une méthode appropriée. Ce taux ne doit pas dépasser 10 Nml/h d'hydrogène gazeux.

6.2.6.2.3 Essai de cyclage à des températures extrêmes

- a) Le nombre total de cycles est fixé à 11 000 pour la soupape antiretour et à 50 000 pour le robinet d'arrêt. La soupape est placée dans un montage d'essai conforme aux instructions d'installation du fabricant. La soupape est actionnée de manière répétée en continu avec de l'hydrogène gazeux, à toutes les pressions prescrites.

Un cycle de fonctionnement se définit comme suit:

- i) Une soupape antiretour est placée sur un montage d'essai et une pression égale à 100 % de la PSN (+2/-0 MPa) est appliquée à 6 reprises à l'orifice d'entrée, l'orifice de sortie étant obturé, après quoi on laisse la pression à l'orifice d'entrée retomber à la pression atmosphérique. La pression appliquée sur la sortie de la soupape antiretour est réduite progressivement jusqu'à moins de 60 % de la PSN avant le cycle suivant;
- ii) Une vanne d'arrêt est reliée à un montage d'essai et la pression est appliquée en continu à la fois à l'entrée et à la sortie de la vanne.

Par cycle de fonctionnement, on entend un actionnement complet et un retour au point de départ.

- b) Les essais sont effectués sur un échantillon stabilisé aux températures ci-dessous:
- i) Cycle à température ambiante. L'échantillon subit des cycles d'ouverture-fermeture à une pression égale à 125 % de la PSN (+2/-0 MPa) pendant 90 % du nombre total de cycles, la température étant stabilisée à 20 (±5) °C. Une fois les cycles de fonctionnement à température ambiante achevés, l'échantillon doit subir avec succès l'essai de fuite à température ambiante défini au paragraphe 6.2.6.2.2;
 - ii) Cycle à haute température. L'échantillon est ensuite soumis à des cycles de fonctionnement à une pression égale à 125 % de la PSN (+2/-0 MPa) pendant 5 % du nombre total de cycles à une température stabilisée de 85 °C au minimum. Une fois ces cycles achevés, l'échantillon doit subir avec succès l'essai de fuite à haute température (85 °C) défini au paragraphe 6.2.6.2.2;
 - iii) Cycle à basse température. L'échantillon est ensuite soumis à des cycles de fonctionnement à une pression égale à 100 % de la PSN (+2/-0 MPa) pendant 5 % du nombre total de cycles à une température stabilisée de -40 °C au minimum. Une fois ces cycles achevés, l'échantillon doit subir avec succès l'essai de fuite à basse température (-40 °C) défini au paragraphe 6.2.6.2.2.
- c) Essai de battement de la soupape antiretour. Après avoir été soumise à 11 000 cycles de fonctionnement et aux essais de fuite décrits au paragraphe 6.2.6.2.3 b), la soupape antiretour est soumise pendant 24 h au débit causant l'effet de battement maximum. Une fois l'essai achevé, la soupape antiretour doit subir avec succès l'essai de fuite à température ambiante (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 par le sel

L'échantillon est placé dans un montage d'essai simulant sa position normale d'installation et exposé pendant 500 h à un brouillard d'eau salée, défini dans la norme ASTM B117 (Appareil à brouillard salin). La température dans la chambre de brumisation est maintenue à 30-35 °C. Cette solution est composée de 5 % de chlorure de sodium et de 95 % d'eau distillée en poids.

Immédiatement après l'essai de corrosion, l'échantillon est rincé et délicatement débarrassé de toute trace de sel, examiné pour voir s'il a subi une déformation, après quoi:

- a) Il ne doit pas présenter de signe de dégradation physique qui pourrait nuire à son fonctionnement, comme des fissures, un ramollissement ou des boursouflures; les altérations superficielles telles que les piqûres ou les taches ne sont pas prises en considération;
- b) Il doit subir avec succès l'essai de fuite à température ambiante (par. 6.2.6.2.2);
- c) Il doit subir avec succès l'essai de résistance hydrostatique (par. 6.2.6.2.1).

6.2.6.2.5 Essai d'exposition aux agents chimiques de l'environnement automobile

La résistance à la dégradation due à une exposition aux liquides avec lesquels le véhicule est en contact est déterminée au moyen de l'essai ci-après:

- a) L'entrée et la sortie de la soupape sont raccordées ou obturées conformément aux instructions de montage du fabricant. Les surfaces extérieures de la soupape sont exposées pendant 24 h, à une température de 20 (\pm 5) °C, à chacun des liquides ci-dessous:
 - i) Acide sulfurique dilué à 19 % (en volume) dans de l'eau;
 - ii) Hydroxyde de sodium dilué à 25 % (en poids) dans de l'eau;
 - iii) Nitrate d'ammonium, dilué à 28 % (en poids) dans de l'eau; et
 - iv) Liquide pour lave-glace (composé pour moitié en volume d'alcool méthylique et pour moitié d'eau).

Si nécessaire, on complète le plein des liquides pour que la soupape reste immergée pendant toute la durée de l'essai. Chaque liquide est utilisé pour un essai distinct. Un échantillon peut être exposé à tous les liquides les uns après les autres.

- b) Après avoir été exposé à chacun des liquides, l'échantillon est essuyé et rincé à l'eau;
- c) Il ne doit pas présenter de signe de dégradation physique qui pourrait nuire à son fonctionnement, comme des fissures, un ramollissement ou des boursouflures; les altérations superficielles telles que les piqûres ou les taches ne sont pas prises en considération. Après tous les essais d'exposition, le ou les échantillons doivent satisfaire à l'essai de fuite à température ambiante (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 soupapes antiretour et des vannes d'arrêt automatiques si l'échantillon contient des matériaux non métalliques en contact avec l'atmosphère dans des conditions normales de fonctionnement.

- a) Les matériaux non métalliques constituant les joints d'étanchéité qui sont exposés aux agents atmosphériques, pour lesquels une déclaration satisfaisante de propriétés n'a pas été déposée par le demandeur, ne doivent ni se fissurer ni présenter de signe visible de détérioration après avoir été exposés à de l'oxygène pendant 96 h, à une température de 70 °C, sous une pression de 2 MPa, conformément à la norme ASTM D572 (Détérioration du caoutchouc due à la chaleur et à l'oxygène);
- b) La résistance à l'ozone de tous les élastomères doit être prouvée au moyen de l'une des 2 méthodes ci-après ou des deux à la fois:
 - i) Détermination de la résistance à l'ozone de chacun de leurs composés;
 - ii) Essai des composants conformément à la norme ISO 1431/1, la norme ASTM D1149 ou une méthode d'essai équivalente.

6.2.6.2.7 Essais électriques

Les essais électriques s'appliquent à la qualification des vannes d'arrêt automatiques mais ne s'appliquent pas à la qualification des soupapes antiretour.

- a) Essai sous tension anormale. L'électrovanne est raccordée à une source de courant continu à tension variable, selon les modalités suivantes:
 - i) L'électrovanne est maintenue à température constante pendant une heure, à une tension égale à 1,5 fois la tension nominale;
 - ii) La tension est portée à 2 fois la tension nominale ou à 60 V, si cette dernière valeur est inférieure, et cette tension est maintenue pendant une minute;
 - iii) Aucune défaillance ne doit causer une fuite vers l'extérieur, une ouverture non voulue de la soupape ou une situation d'insécurité comme de la fumée, des flammes ou un début de fusion.

La tension minimale d'ouverture à la PSN et à la température ambiante ne doit pas dépasser 9 V pour un système 12 V et ou 18 V pour un système 24 V.

- b) Essai de résistance à l'isolement. Un courant continu d'une tension de 1 000 V est appliqué entre la borne d'alimentation et le boîtier de la soupape pendant au moins 2 s. La résistance minimale admissible est de 240 k Ω .

6.2.6.2.8 Essai de vibrations

La soupape est soumise à 100 % de la PSN (+2/-0 MPa) avec de l'hydrogène, obturée à ses 2 extrémités et soumise à des vibrations pendant 30 min le long de chacun des 3 axes orthogonaux (axe vertical, axe latéral et axe longitudinal), aux fréquences de résonance les plus fortes. La fréquence de résonance la plus forte est obtenue par une accélération de 1,5 g avec un balayage d'une plage de fréquences sinusoidales comprises entre 10 et 40 Hz pendant 10 min. Si la fréquence de résonance n'est pas comprise dans cette gamme, l'essai est effectué à la fréquence de 40 Hz. À la suite de cet essai, aucun échantillon ne doit présenter de détérioration extérieure visible susceptible de compromettre ses caractéristiques fonctionnelles. Une fois l'essai achevé, l'échantillon doit satisfaire aux prescriptions de l'essai de fuite à température ambiante défini au paragraphe 6.2.6.2.2.

6.2.6.2.9 Essai de fissuration par corrosion sous tension

Dans le cas des soupapes contenant des organes constitués d'un alliage à base de cuivre (par exemple du laiton), un seul échantillon est soumis aux essais. La soupape est démontée, tous ses organes en alliage de cuivre sont dégraissés puis elle est remontée avant d'être exposée en continu pendant 10 jours à un brouillard d'ammoniac contenu dans une chambre en verre fermée par un couvercle en verre.

De l'ammoniaque d'une densité relative de 0,94 est placé au fond de la chambre en verre, sous l'échantillon, à une concentration d'au moins 20 ml par litre de volume du récipient. L'échantillon est placé à 35 (\pm 5) mm au-dessus de la solution d'ammoniaque, sur un plateau en matériau inerte.

Le brouillard d'ammoniac est maintenu à la pression atmosphérique, à une température de 35 (± 5) °C. Les organes constitués d'un alliage à base de cuivre ne doivent présenter ni fissure ni décollement pendant l'essai.

6.2.6.2.10 Essai d'exposition à l'hydrogène prérefroidi

La vanne est exposée à de l'hydrogène gazeux prérefroidi à -40 °C au minimum sous un débit de 30 g/s à une température externe de 20 (± 5) °C pendant une durée minimale de 3 min. La vanne est alternativement dépressurisée et repressurisée après une période de maintien en pression de 2 min. Ce cycle est répété 10 fois. Puis il est répété 10 fois de plus, mais avec une période de maintien en pression de 15 min. La vanne doit ensuite satisfaire aux prescriptions de l'essai de fuite à température ambiante décrit au paragraphe 6.2.6.2.2.

6.3 Procédures d'essai touchant à la sécurité électrique (par. 5.3)

6.3.1 Méthode de mesure de la résistance d'isolement

6.3.1.1 Prescription générale

La résistance d'isolement pour chaque rail haute tension du véhicule doit être mesurée ou déterminée par calcul sur la base de valeurs de mesure obtenues pour chaque partie ou élément d'un rail haute tension (cette méthode étant ci-après désignée «mesure fractionnée»).

6.3.1.2 Méthode de mesure

La mesure de la résistance d'isolement se fait par une méthode de mesure appropriée choisie parmi celles énumérées aux paragraphes 6.3.1.2.1 à 6.3.1.2.2, en fonction de la charge électrique des éléments sous tension ou de la résistance d'isolement.

La gamme de tension du circuit électrique à mesurer est déterminée à l'avance à l'aide de schémas du circuit électrique.

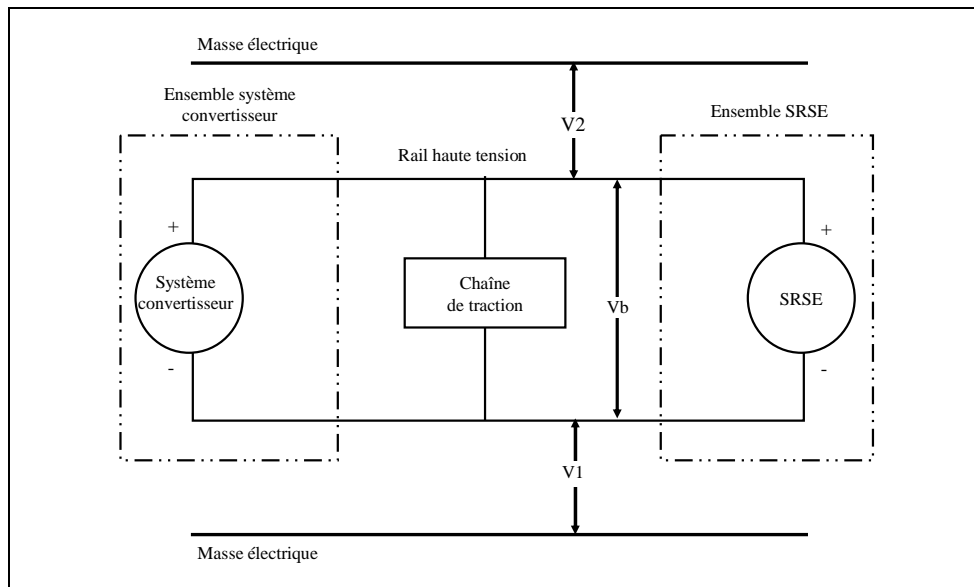
En outre, les modifications nécessaires pour permettre la mesure de la résistance d'isolement peuvent être effectuées, telles que l'enlèvement du carter de protection pour avoir accès aux éléments sous tension, la pose de câbles de mesure et la modification du logiciel.

Dans les cas où les valeurs mesurées ne sont pas stables du fait du fonctionnement du système embarqué de surveillance de la résistance d'isolement, les modifications nécessaires pour l'exécution de la mesure peuvent être effectuées, comme d'interrompre le fonctionnement du dispositif en question ou de l'enlever. En outre, quand le dispositif est enlevé, il doit être démontré, sur la base de schémas, etc., que cette opération ne modifie pas la résistance d'isolement entre les éléments sous tension et la masse électrique.

Des précautions très sérieuses doivent être prises pour éviter les courts-circuits ou les risques de décharge électrique, si l'on emploie cette méthode de confirmation qui peut nécessiter une alimentation directe du circuit à haute tension.

- 6.3.1.2.1 Méthode de mesure utilisant une source de tension continue extérieure au véhicule
- 6.3.1.2.1.1 Instrument de mesure
- Il doit être utilisé un instrument d'essai de résistance d'isolement pouvant appliquer une tension continue supérieure à la tension de fonctionnement du rail haute tension.
- 6.3.1.2.1.2 Méthode de mesure
- Un instrument d'essai de résistance d'isolement est raccordé entre les éléments sous tension et la masse électrique. La résistance d'isolement est alors mesurée par application d'une tension continue au moins égale à la moitié de la tension de fonctionnement du rail haute tension.
- Si le système a plusieurs gammes de tension (par exemple à cause de la présence d'un convertisseur d'appoint) dans un circuit galvaniquement relié, et que certains des composants ne peuvent pas supporter la tension de fonctionnement du circuit complet, la résistance d'isolement entre ces composants et la masse électrique peut être mesurée séparément par application de la tension de fonctionnement propre de ceux-ci, ces composants étant déconnectés.
- 6.3.1.2.2 Méthode de mesure utilisant le SRSE du véhicule comme source de tension continue
- 6.3.1.2.2.1 Conditions concernant le véhicule d'essai
- Le rail haute tension est mis sous tension par le SRSE du véhicule et/ou le système convertisseur, et la tension du SRSE et/ou du système convertisseur pendant tout l'essai doit être au moins égale à la tension de fonctionnement nominale telle qu'elle est spécifiée par le constructeur du véhicule.
- 6.3.1.2.2.2 Instrument de mesure
- Le voltmètre utilisé pour cet essai doit mesurer les tensions continues et avoir une résistance interne d'au moins 10 MΩ.
- 6.3.1.2.2.3 Mode opératoire
- 6.3.1.2.2.3.1 Première étape
- La tension est mesurée comme indiqué à la figure 9 et la tension (V_b) du rail haute tension est enregistrée. V_b doit être égale ou supérieure à la tension de fonctionnement nominale du SRSE et/ou du système convertisseur telle qu'elle est spécifiée par le constructeur du véhicule.

Figure 8
Mesure de V_b , V_1 et V_2



6.3.1.2.2.3.2 Deuxième étape

La tension (V_1) entre le pôle négatif du rail haute tension et la masse électrique est mesurée et enregistrée (voir fig. 8).

6.3.1.2.2.3.3 Troisième étape

La tension (V_2) entre le pôle positif du rail haute tension et la masse électrique est mesurée et enregistrée (voir fig. 8).

6.3.1.2.2.3.4 Quatrième étape

Si V_1 est égale ou supérieure à V_2 , une résistance normalisée connue (R_o) est insérée entre le pôle négatif du rail haute tension et la masse électrique. La résistance R_o étant en place, la tension (V_1') entre le pôle négatif du rail haute tension et la masse électrique est mesurée (voir fig. 9).

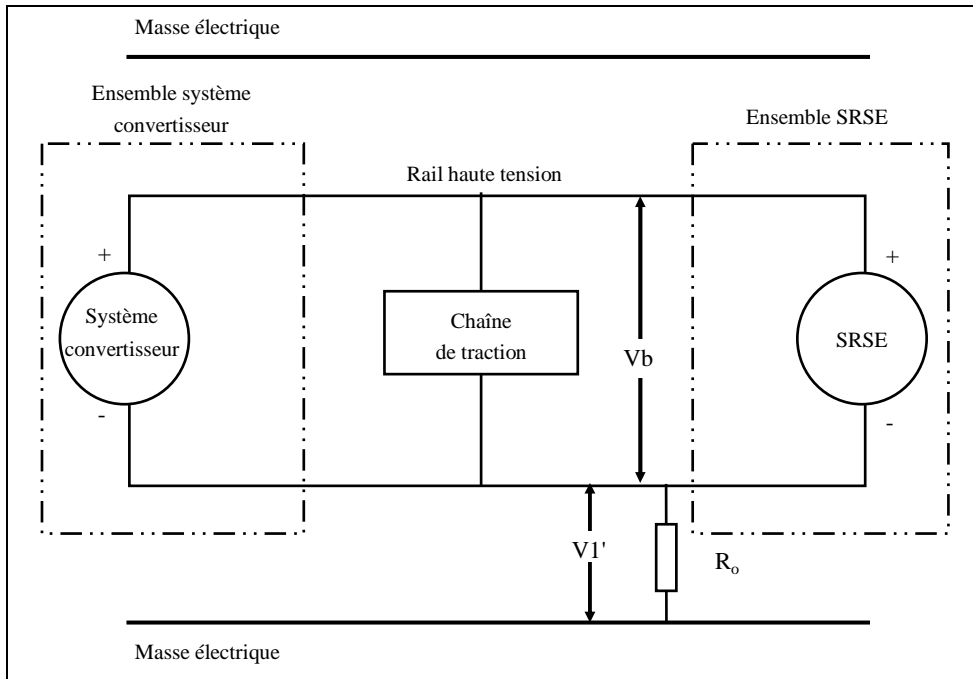
L'isolement électrique (R_i) est calculé conformément à la formule suivante:

$$R_i = R_o \cdot (V_b/V_1' - V_b/V_1) \text{ ou } R_i = R_o \cdot V_b \cdot (1/V_1' - 1/V_1)$$

La valeur R_i obtenue, qui représente la résistance d'isolement électrique (exprimée en ohms – Ω), est divisée par la tension de fonctionnement du rail haute tension, exprimée en volts (V):

$$R_i \Omega / V = R_i \Omega / \text{tension de fonctionnement (V)}$$

Figure 9
Mesure de V1'



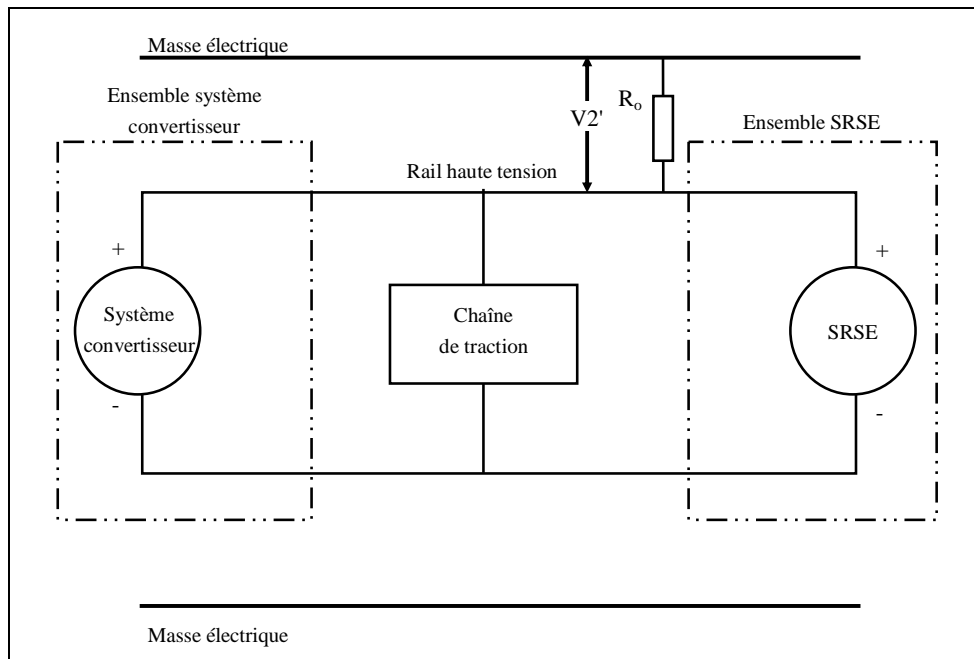
Si V_2 est supérieure à V_1 , une résistance normalisée connue (R_o) est insérée entre le pôle positif du rail haute tension et la masse électrique. La résistance R_o étant en place, la tension (V_2') entre le pôle positif du rail haute tension et la masse électrique est mesurée (voir fig. 10). L'isolement électrique (R_i) est calculé conformément à la formule indiquée ci-dessous. Cette valeur d'isolement électrique (en ohms) est divisée par la tension de fonctionnement nominale du rail haute tension (en volts). L'isolement électrique (R_i) est calculé conformément à la formule suivante:

$$R_i = R_o * (V_b / V_2' - V_b / V_2) \text{ ou } R_i = R_o * V_b * (1 / V_2' - 1 / V_2)$$

La valeur R_i obtenue, qui représente la résistance d'isolement électrique (exprimée en ohms – Ω), est divisée par la tension de fonctionnement du rail haute tension, exprimée en volts (V):

$$R_i \Omega / V = R_i \Omega / \text{tension de fonctionnement}$$

Figure 10
Mesure de V_2'



6.3.1.2.2.3.5 Cinquième étape

La valeur d'isolement électrique R_i (en Ω) divisée par la tension de fonctionnement du rail haute tension (en V) donne la résistance d'isolement (en Ω/V).

(Note 1: La résistance normalisée connue R_o (en Ω) correspond à la valeur de la résistance d'isolement minimale requise (en Ω/V) multipliée par la tension de fonctionnement du véhicule $\pm 20\%$ (en V). La valeur de R_o ne doit pas nécessairement être exactement égale à cette valeur, les équations restant valides pour toute valeur de R_o ; cependant, une valeur de R_o située dans cette plage devrait permettre de mesurer la tension avec une résolution satisfaisante.)

6.3.2 Méthode de confirmation du bon fonctionnement du système embarqué de surveillance de la résistance d'isolement

Le bon fonctionnement du système embarqué de surveillance de la résistance d'isolement est confirmé par application de la méthode ci-après ou d'une méthode équivalente.

On insère une résistance qui n'abaisse pas la résistance d'isolement entre la borne surveillée et la masse électrique au-dessous de la valeur minimale requise de résistance d'isolement. Le signal d'alarme doit être actionné.

6.3.3 Protection contre les contacts directs avec les éléments sous tension

6.3.3.1 Calibres d'accessibilité

Les calibres d'accessibilité à utiliser pour vérifier la protection des personnes contre l'accès à des éléments sous tension sont décrits au tableau 3.

6.3.3.2 Conditions d'essai

On applique le calibre d'accessibilité contre toutes les ouvertures du carter de protection avec la force indiquée au tableau 3. S'il pénètre partiellement ou entièrement, il doit être essayé dans toutes les positions possibles, mais en aucun cas la face d'arrêt ne doit passer entièrement par l'ouverture.

Il est considéré que les barrières internes font partie du carter de protection.

Une source électrique à basse tension (comprise entre 40 et 50 V) branchée en série avec une lampe témoin appropriée est raccordée, si nécessaire, entre le calibre d'accessibilité et les éléments sous tension situés à l'intérieur de la barrière ou du carter de protection.

La méthode du circuit test est aussi appliquée aux éléments sous tension mobiles de l'équipement haute tension.

Les éléments mobiles internes peuvent être actionnés lentement pour les essais lorsque cela est possible.

6.3.3.3 Conditions d'acceptation

Le calibre d'accessibilité ne doit entrer en contact avec aucun des éléments sous tension.

Si le respect de cette prescription est contrôlé au moyen d'un circuit témoin connecté entre le calibre d'accessibilité et les éléments sous tension, la lampe témoin ne doit pas s'allumer.

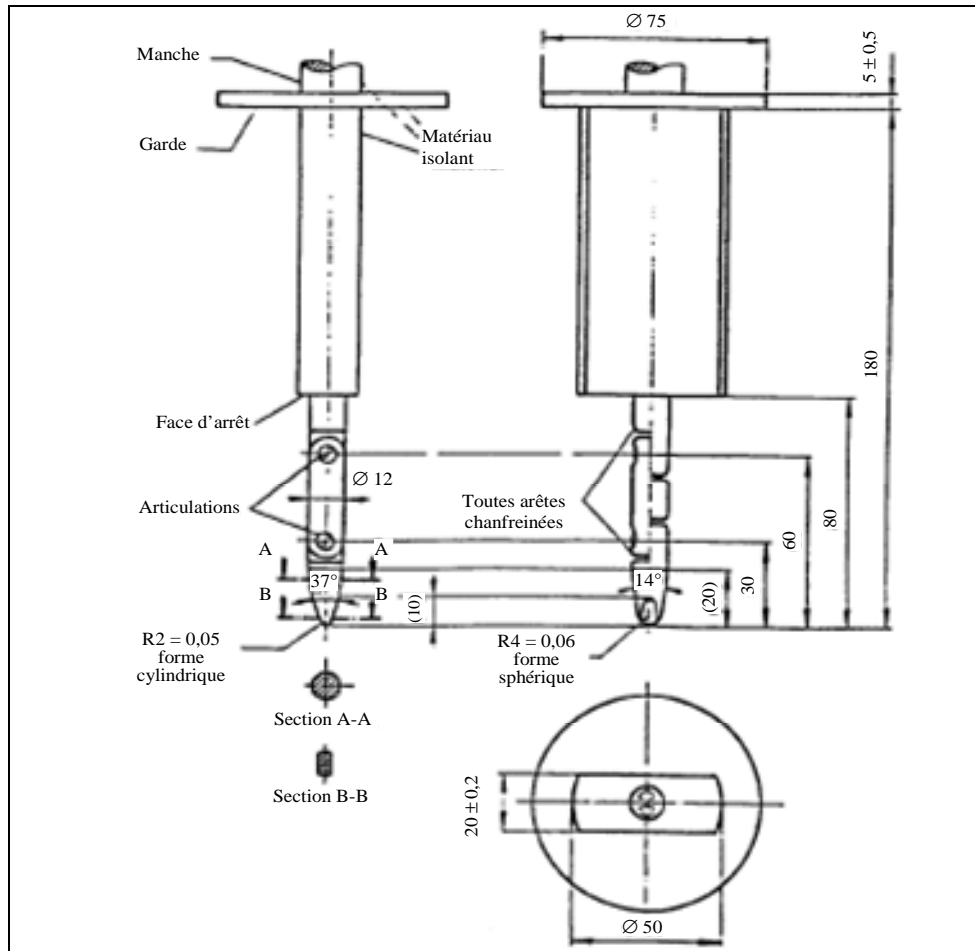
Dans le cas de l'essai de contrôle pour le degré de protection IPXXB, le doigt d'épreuve articulé peut pénétrer sur toute sa longueur de 80 mm, mais sa face d'arrêt (de 50 mm par 20 mm de diamètre) ne doit pas pouvoir passer par l'ouverture. À partir de la position droite, les 2 articulations du doigt d'épreuve doivent être repliées successivement jusqu'à un angle allant jusqu'à 90° par rapport à l'axe de la section adjacente du doigt et orientées dans toutes les positions possibles.

Dans le cas des essais de contrôle du degré de protection IPXXD, le calibre d'accessibilité peut pénétrer sur toute sa longueur, mais la plaque d'arrêt ne doit pas passer complètement par l'ouverture.

Tableau 3
**Calibres d'accessibilité pour les essais de protection des personnes
 contre l'accès aux parties dangereuses**

Premier chiffre	Lettre additionnelle	Calibre d'accessibilité (dimensions en mm)	Force pour l'essai
2	B	<p>Doigt d'éprouve articulé</p> <p>Voir fig. 1 pour toutes les dimensions</p> <p>Isolant</p> <p>Plaque d'arrêt ($\varnothing 50 \times 20$)</p> <p>$\varnothing 12$</p> <p>Doigt d'éprouve articulé (métal)</p> <p>80</p>	10 N \pm 10 %
4, 5, 6	D	<p>Tige d'essai de 1,0 mm de diamètre et 100 mm de long</p> <p>Sphère 35 \pm 0,2</p> <p>Approx. 100</p> <p>100 \pm 0,2</p> <p>$\varnothing 1,0$</p> <p>Manche (isolant)</p> <p>Face d'arrêt (isolant)</p> <p>Fil rigide d'essai (métal)</p> <p>Extrémité ébavurée</p> <p>+0,05 0</p>	1 N \pm 10 %

Figure 11
Doigts d'épreuve articulés



Matériau: métal, sauf indication contraire

Dimensions linéaires en millimètres

Tolérances des dimensions à défaut de tolérance indiquée:

sur les angles: 0/10°;

sur les dimensions linéaires:

jusqu'à 25 mm: 0/-0,05

au-dessus de 25 mm: $\pm 0,2$.

Les 2 articulations doivent permettre un mouvement dans le même plan et le même sens de 90° avec une tolérance de 0 à +10°.

6.3.4 Méthode d'essai pour la mesure de la résistance électrique

Méthode d'essai utilisant un mégohmmètre

Le mégohmmètre est relié aux points de mesure (en règle générale, la masse électrique, et l'enveloppe conductrice/la barrière de protection électrique).

On mesure la résistance à l'aide d'un mégohmmètre satisfaisant aux critères suivants:

Mégohmmètre: mesure du courant: au moins 0,2 A

Résolution 0,01 ohm ou moins

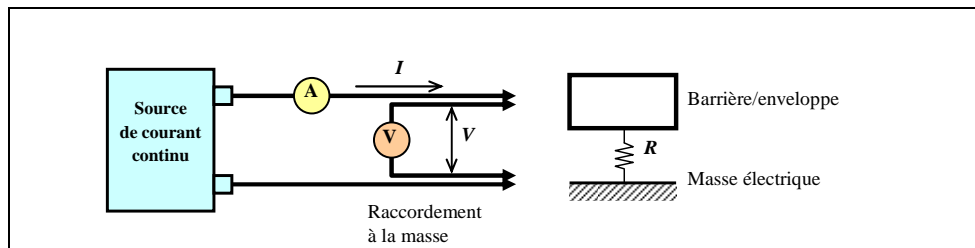
La résistance R doit être inférieure à 0,1 ohm.

Méthode d'essai utilisant une source de courant continu, un voltmètre et un ampèremètre.

Figure ci-dessous: exemple de méthode d'essai utilisant une source de courant continu, un voltmètre et un ampèremètre.

Figure 12

Raccordement à la barrière/enveloppe



Procédure d'essai

La source de courant continu, le voltmètre et l'ampèremètre sont reliés aux points de mesure (en règle générale, la masse électrique et l'enveloppe conductrice/la barrière de protection électrique).

On règle la tension de la source de courant continu de manière à obtenir une intensité supérieure à 0,2 A.

On mesure l'intensité «I» et la tension «V».

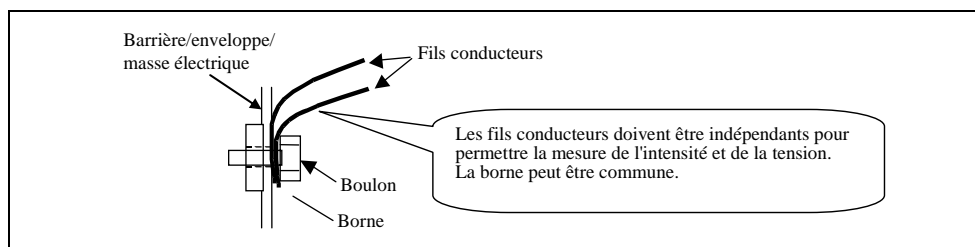
On calcule la résistance «R» au moyen de la formule suivante:

$$R = V / I$$

La résistance R doit être inférieure à 0,1 ohm.

Note:

Si l'on utilise des fils conducteurs pour mesurer la tension et l'intensité, chacun d'entre eux doit être raccordé de manière indépendante à la barrière de protection électrique/enveloppe/masse électrique. La borne peut être commune pour la mesure de la tension et de l'intensité.



- 6.3.5 Conditions d'essai et procédure d'essai applicables après un choc
- 6.3.5.1 Conditions d'essai
- 6.3.5.1.1 Généralités
- On applique les conditions d'essais indiquées aux paragraphes 6.3.5.1.2 à 6.3.5.1.4.
- Lorsqu'une plage est définie, le véhicule doit pouvoir satisfaire aux exigences énoncées en tout point à l'intérieur de cette plage.
- 6.3.5.1.2 Réglage de la chaîne de traction électrique
- 6.3.5.1.2.1 Le SRSE peut être dans tout état de charge permettant le fonctionnement normal de la chaîne de traction selon les recommandations du constructeur.
- 6.3.5.1.2.2 La chaîne de traction électrique doit pouvoir être mise sous tension avec ou sans l'aide des sources d'énergie électrique initiales (alternateur, SRSE ou système de conversion de l'énergie électrique, par exemple), mais:
- 6.3.5.1.2.2.1 Il est possible de procéder à l'essai alors que tout ou partie de la chaîne de traction électrique n'est pas sous tension, pour autant que cela ne fausse pas le résultat de l'essai. Dans le cas où la chaîne de traction électrique n'est que partiellement sous tension, la protection contre toute décharge électrique doit être obtenue soit par des moyens physiques soit par résistance d'isolement et sur la base de preuves supplémentaires le démontrant.
- 6.3.5.1.2.2.2 Si la chaîne de traction n'est pas sous tension et qu'elle est équipée d'une fonction de déconnexion automatique, il est possible de l'activer pour l'essai. Dans ce cas, il doit être démontré que la déconnexion automatique aurait effectivement fonctionné pendant l'essai de choc. Ce processus implique un signal automatique d'actionnement ainsi que la coupure galvanique, en fonction des conditions rencontrées pendant le choc.
- 6.3.5.1.3 Les Parties contractantes peuvent autoriser des modifications au système d'alimentation en carburant de manière qu'une quantité appropriée de carburant puisse être utilisée pour faire fonctionner le moteur ou le système de conversion en énergie électrique.
- 6.3.5.1.4 Les conditions d'essai des véhicules autres que celles indiquées aux paragraphes 6.3.5.1.1 à 6.3.5.1.3 sont telles qu'elles sont spécifiées dans les protocoles d'essai de choc des Parties contractantes.
- 6.3.5.2 Procédure d'essai pour la protection des occupants des véhicules électriques contre le contact avec les éléments à haute tension et la fuite d'électrolyte
- On trouvera dans la présente section la description des procédures d'essai visant à démontrer la conformité avec les prescriptions du paragraphe 5.3.2 relatives à la sécurité électrique.
- Avant de procéder à l'essai de choc, il faut mesurer la tension du rail haute tension (V_b sur la figure 13), l'enregistrer et vérifier qu'elle est conforme à la tension de fonctionnement du véhicule préconisée par le constructeur.
- 6.3.5.2.1 Préparation de l'essai et matériel requis
- Si l'on utilise une fonction de déconnexion de la haute tension, les mesures doivent être relevées côté amont et côté aval du dispositif de déconnexion.

Toutefois, si la fonction de déconnexion de la haute tension est intégrée au SRSE ou au système de conversion de l'énergie et si le rail haute tension du SRSE ou le système de conversion bénéficie du degré de protection IPXXB à la suite de l'essai de choc, les mesures peuvent être relevées uniquement en aval du dispositif de déconnexion.

Le voltmètre utilisé pour l'essai considéré ici doit mesurer le courant continu et avoir une résistance interne minimale de 10 M Ω .

6.3.5.2.2 Les instructions ci-après peuvent être appliquées pour mesurer la tension.

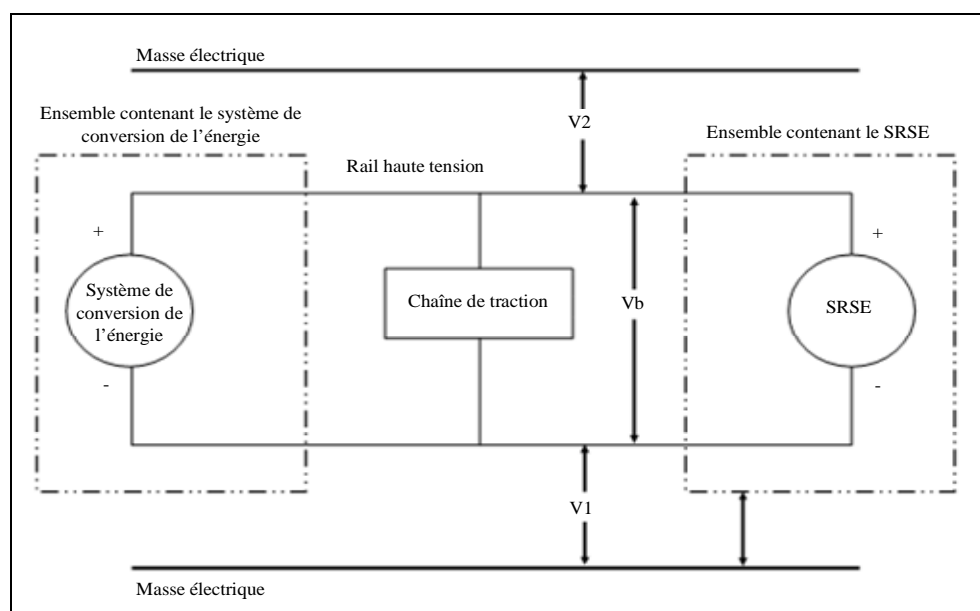
Après l'essai de choc, mesurer les tensions des rails haute tension (V_b , V_1 et V_2 sur la figure 13).

La tension doit être mesurée entre 5 et 60 s après le choc.

Cette procédure ne s'applique pas si l'essai est effectué alors que la chaîne de traction électrique n'est pas sous tension.

Figure 13

Mesure de V_b , V_1 et V_2



6.3.5.2.3 Résistance d'isolement

Voir le paragraphe 6.3.1.2 «Méthode de mesure»

Toutes les mesures destinées au calcul des tensions ou de l'isolement électrique sont faites au moins 5 s après le choc.

On notera que la résistance d'isolement peut aussi se mesurer au moyen d'un mégohmmètre ou d'un oscilloscope. Dans ce cas, il peut s'avérer nécessaire de désactiver le système embarqué de surveillance de la résistance d'isolement.

6.3.5.2.4 Protection physique

Après l'essai de choc, toutes les parties entourant les éléments sous haute tension sont ouvertes, démontées ou retirées sans l'aide d'outils. Toutes les parties restantes sont considérées comme faisant partie de la protection physique.

Le doigt d'épreuve articulé, décrit au paragraphe 6.3.3, est introduit dans tous les interstices ou les ouvertures de la protection physique, avec une force d'insertion de $10\text{ N} \pm 10\%$, aux fins de l'évaluation de la sécurité. Si le doigt d'essai articulé pénètre partiellement ou entièrement dans la protection, il est essayé dans toutes les positions indiquées ci-dessous.

À partir de la position verticale, les 2 articulations du doigt d'épreuve sont repliées progressivement jusqu'à former un angle maximum de 90° par rapport à l'axe de la section adjacente du doigt et placées dans toutes les positions possibles.

Les barrières internes électriques sont considérées comme faisant partie du carter de protection.

Le cas échéant, une source électrique basse tension (entre 40 et 50 V) est branchée en série avec une lampe appropriée, entre le doigt d'épreuve articulé et les éléments à haute tension situés à l'intérieur de la barrière électrique ou du carter de protection.

6.3.5.2.5 Conditions d'acceptation

Les prescriptions énoncées au paragraphe 5.3.2.2.3 sont considérées comme remplies si le doigt d'essai articulé défini au paragraphe 6.3.3 ne peut entrer en contact avec les parties à haute tension.

Le cas échéant, un miroir ou un endoscope peut être utilisé pour voir si le doigt d'épreuve articulé entre en contact avec les rails haute tension.

Si le respect de cette prescription est vérifié au moyen d'un circuit témoin entre le doigt d'épreuve articulé et les éléments à haute tension, la lampe témoin ne doit pas s'allumer.

6.3.5.2.6 Fuites d'électrolyte

Si nécessaire, un revêtement approprié est appliqué sur la protection physique afin de détecter toute fuite d'électrolyte du SRSE à la suite de l'essai de choc.

À moins que le constructeur ne fournisse les moyens de distinguer l'électrolyte d'autres liquides, toutes les fuites de liquide sont considérées comme des fuites d'électrolyte.

6.3.5.2.7 Maintien en place du SRSE

La vérification de la conformité s'effectue par inspection visuelle.

7. Véhicules équipés d'un système de stockage d'hydrogène liquéfié

7.1 Prescriptions facultatives s'appliquant 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 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 et du système de stockage d'hydrogène liquéfié

Paragraphe 7.4: Procédures d'essai pour la qualification de la conception du système de stockage d'hydrogène liquéfié

Paragraphe 7.5: Procédures d'essai pour la 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 relatives à l'intégrité du système de stockage d'hydrogène liquéfié.

Le système de stockage d'hydrogène doit remplir les conditions prévues pour les prescriptions d'essai fonctionnelles énoncées ici. Tous les systèmes de stockage d'hydrogène liquéfié fabriqués en vue d'être utilisés sur des véhicules routiers doivent être conformes à ces prescriptions.

Le fabricant doit indiquer la pression de service maximale admissible (PSMA) pour le réservoir intérieur.

Le tableau 4 récapitule les essais à exécuter.

Les critères indiqués s'appliquent à la qualification des systèmes de stockage destinés à être utilisés sur des véhicules neufs, et non à la requalification d'un système en vue de son utilisation au-delà de sa durée d'utilisation prévue ou à la requalification d'un système ayant pu être gravement endommagé.

Tableau 4

Vue d'ensemble des essais de vérification en vue de la qualification de la conception

<p>Paragraphe 7.2.1 – Essais de vérification des caractéristiques mesurées de référence</p> <p>7.2.1.1 Essai de pression d'épreuve</p> <p>7.2.1.2 Essai d'éclatement initial de référence (réservoir intérieur)</p> <p>7.2.1.3 Essai de référence du nombre de cycles de pression</p>
<p>Paragraphe 7.2.2 – Essais de vérification des caractéristiques prévues en utilisation routière</p> <p>7.2.2.1 Essai de gestion de l'évaporation</p> <p>7.2.2.2 Essai de fuite</p> <p>7.2.2.3 Essai de perte de vide</p>
<p>Paragraphe 7.2.3 – Essai du brasier</p>
<p>Paragraphe 7.2.4 – Essais de vérification des composants</p>

- 7.2.1 Essais de vérification des caractéristiques mesurées de référence
- 7.2.1.1 Essai de pression d'épreuve
- On pressurise un système à la pression $p_{\text{test}} \geq 1,3$ (PSMA $\pm 0,1$ MPa), conformément à la procédure d'essai décrite au paragraphe 7.4.1.1. Il ne doit pas se produire de déformation visible, de perte de pression ou de fuite détectable.
- 7.2.1.2 Essai d'éclatement initial de référence
- L'essai se déroule conformément à la procédure décrite au paragraphe 7.4.1.2, sur un spécimen de réservoir intérieur dépourvu de son enveloppe extérieure et non isolé.
- 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:
- a) La pression de service maximale admissible (PSMA) (en MPa) plus 0,1 MPa multiplié par 3,25;
- ou
- b) La pression de service maximale admissible (PSMA) (en MPa) plus 0,1 MPa multiplié par 1,5 et par R_m/R_p , R_m étant la résistance mécanique minimale à la traction du matériau du réservoir et R_p (limite minimale d'élasticité) valant 1,0 pour les aciers austénitiques et 0,2 pour les autres aciers.
- 7.2.1.3 Essai de référence du nombre de cycles de pression
- Dans le cas de l'utilisation de réservoirs métalliques ou d'enveloppes sous vide 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 récipients à 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 le même niveau de sécurité qu'une conception fondée sur une norme reconnue et démontrée par calcul.
- Dans le cas de l'utilisation de réservoirs ou d'enveloppes sous vide non métalliques, outre l'essai présenté au paragraphe 7.4.1.3, il incombe au fabricant de concevoir des essais adaptés afin de démontrer le même niveau de sécurité par rapport à un réservoir métallique.
- 7.2.2 Essais de vérification des caractéristiques prévues en utilisation routière
- 7.2.2.1 Essai de gestion de l'évaporation
- L'essai de gestion de l'évaporation est réalisé sur un système de stockage d'hydrogène liquéfié doté de tous les organes et dispositifs présentés au paragraphe G.1.b) du préambule (fig. 7 de la section G du préambule). 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 dispositif d'évaporation maintient la pression dans le réservoir intérieur en dessous de la pression de service maximale admissible.

- 7.2.2.2 Essai de fuite d'hydrogène
- Après l'essai de gestion de l'évaporation (voir le paragraphe 7.2.2.1), on maintient le système à la pression d'évaporation et on mesure le débit total de gaz s'échappant par fuite conformément à la procédure d'essai décrite au paragraphe 7.4.2.2. Le débit maximal admissible s'échappant depuis le système de stockage d'hydrogène est de $R * 150 \text{ Nml/min}$
- où
- $$R = (V_{\text{width}} + 1) * (V_{\text{height}} + 0,5) * (V_{\text{length}} + 1) / 30,4$$
- et V_{width} , V_{height} et V_{length} sont respectivement la largeur, la hauteur et la longueur (m) du véhicule.
- 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 G.1.b) du préambule (fig. 7 du préambule). 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 primaires 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 de la résistance au feu: essai du brasier
- Un système au moins doit démontrer le fonctionnement des dispositifs de décompression et l'absence de rupture dans les conditions suivantes de retrait du service. La procédure d'essai est décrite au paragraphe 7.4.3.
- Un système de stockage d'hydrogène est rempli à la moitié du niveau d'hydrogène liquéfié, puis exposé au feu conformément à la procédure d'essai décrite au paragraphe 7.4.3. Le ou les dispositifs de décompression doivent évacuer le gaz présent contenu de façon contrôlée et sans rupture.
- En ce qui concerne les réservoirs en acier, l'essai est considéré comme réussi lorsqu'il est satisfait aux prescriptions s'appliquant aux limites de pression pour les dispositifs de décompression (voir le paragraphe 7.4.3). Pour les réservoirs fabriqués dans d'autres matériaux, il convient de démontrer qu'un niveau de sécurité équivalent peut être atteint.
- 7.2.4 Essais de vérification des composants
- Il n'est pas nécessaire de soumettre le système de stockage dans son ensemble à une requalification (par. 7.2) si les dispositifs d'arrêt et de décompression du réservoir (à savoir les composants de la figure 4.7 du préambule, 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 réalisés sur des dispositifs de décompression achevés, représentatifs de la production normale. Ces dispositifs doivent subir avec succès les essais de qualification ci-après:
- Essai de résistance à la pression (selon la procédure décrite au paragraphe 7.4.4.1);

- b) Essai d'étanchéité vers l'extérieur (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 7.4.4.5);
- 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 7 du préambule) finies, 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 d'étanchéité vers l'extérieur (selon la procédure décrite au paragraphe 7.4.4.2);
- c) Essai de résistance à l'usure (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 vieillissement 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

Sur chaque réservoir doit être apposée une étiquette permanente sur laquelle figurent les renseignements ci-après: nom du fabricant, numéro de série, date de fabrication, pression de service maximale admissible et type de carburant. Chaque étiquette placée de la sorte sur le réservoir doit demeurer à sa place. Il est loisible aux Parties contractantes de prévoir des prescriptions supplémentaires en ce qui concerne l'étiquetage.

7.3 Intégrité du système d'alimentation en carburant et 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 de l'air liquéfié résultant de la condensation sur des composants du système d'alimentation.
- 7.3.2 L'isolation des composants doit empêcher la liquéfaction de l'air au contact des surfaces extérieures du système, à moins qu'un dispositif de collecte et de vaporisation de l'air liquéfié 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 pour la qualification de la conception du système de stockage d'hydrogène liquéfié
- 7.4.1 Essais de vérification des caractéristiques mesurées de référence
- 7.4.1.1 Essai de pression d'épreuve
- Le réservoir intérieur et la tuyauterie située entre ce dernier et l'enveloppe 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:
- $$p_{\text{test}} \geq 1,3 (\text{MAWP} \pm 0,1 \text{ MPa})$$
- a) Dans le cas d'un réservoir métallique, soit p_{test} doit être égale ou supérieure à la pression maximale du réservoir intérieur en conditions dégradées (comme indiqué au paragraphe 7.4.2.3), soit le fabricant doit démontrer par calcul qu'aucune rupture ne se produit à la pression maximale du réservoir intérieur en conditions dégradées;
- b) Dans le cas d'un réservoir non métallique, p_{test} doit être égale ou supérieure à la pression maximale du réservoir intérieur en conditions dégradées (comme indiqué au paragraphe 7.4.2.3).
- La procédure d'essai est la suivante:
- a) L'essai s'applique au réservoir intérieur et à la tuyauterie entre celui-ci et l'enveloppe sous vide extérieure 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. Le réservoir est mis en pression à taux constant jusqu'à la pression d'essai p_{test} puis maintenu à cette pression durant 10 min au moins;
- c) L'essai se déroule à la température ambiante. Si l'on utilise du gaz pour pressuriser le réservoir, la montée en pression est effectuée de façon que la température du réservoir corresponde à la température ambiante ou soit proche de celle-ci.
- L'essai est réussi si, durant les 10 premières min qui suivent l'application de la pression d'épreuve, on ne peut déceler visuellement aucune déformation permanente, aucune perte de pression du réservoir, ni aucune fuite.
- 7.4.1.2 Essai d'éclatement initial de référence
- La procédure d'essai est la suivante:
- a) L'essai s'applique au réservoir intérieur 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) La pression est accrue à un rythme constant, qui ne dépasse pas 0,5 MPa/min, jusqu'à ce que le réservoir éclate ou fuie;
- d) Lorsque la pression de service maximale admissible (PSMA) est atteinte, la pression est maintenue constante pendant une période d'observation de 10 min au moins pour contrôler si le réservoir subit une déformation;
- e) La pression est enregistrée ou consignée par écrit du début à la fin de l'essai.

Dans le cas d'un réservoir intérieur en acier, l'essai est réussi si l'un au moins des 2 critères indiqués au paragraphe 5.2.1.2 est respecté. Pour un réservoir intérieur fabriqué dans un alliage d'aluminium ou dans un autre matériau, il convient de définir un critère de résultat positif qui garantit au minimum le même niveau de sécurité que pour un réservoir intérieur en acier.

7.4.1.3 Essai de référence du nombre de cycles de pression

On soumet les réservoirs et/ou les enveloppes sous vide à un nombre de cycles de pression au moins 3 fois supérieur au nombre de cycles complets possibles (de la pression de fonctionnement la plus basse à la pression de fonctionnement la plus élevée), afin de vérifier les caractéristiques prévues en utilisation routière. Le nombre de cycles de pression est déterminé par le fabricant compte tenu de la gamme des pressions 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, respectivement. L'essai est réalisé 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 pressurant et le dépressurant successivement avec de l'azote ou de l'hélium gazeux (prérefroidi).

7.4.2 Essais de vérification des caractéristiques prévues en utilisation routière

7.4.2.1 Essai de gestion de l'évaporation

La procédure d'essai est la suivante:

- a) On effectue un préconditionnement en remplissant le réservoir d'hydrogène liquéfié jusqu'au niveau de remplissage maximal spécifié. Ensuite, on extrait de l'hydrogène jusqu'à ce que le réservoir soit seulement à moitié plein et on laisse le système refroidir complètement durant 24 h au moins et 48 h au plus;
- 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) L'essai est prolongé pendant au moins 48 h de plus après le début de l'évaporation et il n'est arrêté que lorsque la pression s'est stabilisée. La pression est considérée comme stabilisée lorsque sa valeur moyenne n'augmente pas sur une période de 2 h.

La pression du réservoir intérieur est enregistrée ou consignée par écrit du début à la fin de l'essai. L'essai est réussi si les conditions suivantes sont remplies:

- a) La pression se stabilise et demeure en dessous de la PSMA durant tout l'essai;
- b) Les dispositifs de décompression ne s'actionnent pas durant tout l'essai.

7.4.2.2 Essai de fuite

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) Il est rempli d'hydrogène liquéfié jusqu'au niveau de remplissage maximal spécifié;
- c) L'espace sous vide est rempli d'air à débit constant jusqu'à ce que la pression atmosphérique soit atteinte;
- d) L'essai s'arrête dès que le premier dispositif de décompression ne s'ouvre plus.

La pression du réservoir intérieur et de l'enveloppe sous vide est enregistrée ou consignée par écrit du début à la fin de l'essai. La pression d'ouverture du premier dispositif de sécurité est enregistrée ou consignée par écrit. La première partie de l'essai est réussie s'il est satisfait aux conditions suivantes:

- a) Le premier dispositif de décompression s'ouvre en dessous de la pression de service maximale admissible (PSMA) ou à celle-ci et limite la pression à 110 % au maximum de la PSMA;
- b) Le premier dispositif de décompression ne s'ouvre pas à une pression supérieure à la PSMA;
- c) Le dispositif de décompression secondaire ne s'ouvre pas durant tout 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) La régénération du vide s'effectue 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 moment où commence la phase 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) Il est rempli jusqu'au niveau de remplissage maximal spécifié;

- d) La tuyauterie en aval du premier dispositif de décompression est bloquée et l'espace sous vide est rempli d'air à débit constant jusqu'à ce que la pression atmosphérique soit atteinte;
- e) L'essai s'arrête dès que le deuxième dispositif de décompression ne s'ouvre plus.

La pression du réservoir intérieur et de l'enveloppe sous vide est enregistrée ou consignée 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 réussie si le deuxième dispositif de décompression ne s'ouvre pas en dessous de 110 % de la pression de consigne pour le premier dispositif de décompression et limite la pression dans le réservoir à 136 % au maximum de la PSMA en cas d'utilisation d'une soupape de sécurité comme deuxième dispositif de décompression ou à 150 % de la PSMA en cas d'utilisation d'un disque de rupture. Pour les réservoirs fabriqués dans d'autres matériaux, il convient de démontrer qu'un niveau de sécurité équivalent est atteint.

7.4.3 Essai d'exposition au feu (conditions de retrait du service)

Le système de stockage de l'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 complètement fini, équipé de tous ses accessoires.

La première partie de l'essai est conduite comme suit:

- a) L'épreuve du feu externe 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 du volume en eau du réservoir intérieur;
- c) Le réservoir est rempli d'une quantité d'hydrogène égale, en masse, à la moitié de la quantité maximale admissible pouvant être contenue dans le réservoir intérieur;
- d) Un foyer est allumé à 0,1 m au-dessous du réservoir. La longueur et la largeur du foyer doivent dépasser celles du réservoir de 0,1 m. La température du feu doit être au moins égale à 590 °C et il doit continuer à 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 le réservoir intérieur;
- f) L'essai doit se poursuivre jusqu'à ce que la pression dans le réservoir retombe à la pression de départ, ou même en dessous, mais, si le premier dispositif de décompression est d'un type à refermeture, l'essai se poursuit jusqu'à ce que le dispositif en question s'ouvre 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 s'actionne pas en dessous d'une pression égale à 110 % de la pression d'actionnement fixée pour le dispositif de décompression primaire;
- b) Le réservoir n'éclate pas et la pression dans le réservoir intérieur ne sort pas de la plage de défaillance admissible.

La plage de défaillance admissible pour les réservoirs en acier est définie comme suit:

- a) Si une soupape de sécurité fait office de dispositif de décompression secondaire, la pression à l'intérieur du réservoir ne doit pas dépasser 136 % de la PSMA du réservoir intérieur;
- b) Si un disque de rupture fait office de dispositif de décompression secondaire et s'il est situé en dehors de la zone sous vide, la pression à l'intérieur du réservoir doit être limitée à 150 % de la PSMA du réservoir intérieur;
- c) Si un disque de rupture fait office de dispositif de décompression secondaire et s'il est situé dans la zone sous vide, la pression à l'intérieur du réservoir doit être limitée à 150 % de la pression de service maximale admissible plus 0,1 MPa ($PSMA \pm 0,1 \text{ MPa}$) du réservoir intérieur.

Si d'autres matériaux sont utilisés, un niveau de sécurité équivalent doit être prouvé.

7.4.4 Essais de vérification des composants

Les essais doivent être effectués avec de l'hydrogène gazeux conforme à la norme ISO 14687-2 et à la norme SAE J2719. Ils doivent être exécutés à température ambiante, c'est-à-dire $20 (\pm 5) ^\circ\text{C}$, sauf indication contraire. Les essais de qualification des dispositifs de décompression thermocommandés sont énumérés ci-après:

7.4.4.1 Essai de pression

Les composants hydrogène doivent pouvoir supporter sans aucun signe visible de fuite ou de déformation une pression égale à 150 % de la PSMA, les orifices de sortie étant obturés. La pression est ensuite portée à 300 % de la PSMA, sans que le composant ne présente de signe visible de rupture ou de fissure.

Le système de mise sous pression doit être équipé d'une vanne d'arrêt complet et d'un manomètre dont la plage de pression est comprise entre 150 et 200 % de la pression d'essai et la précision de 1 % de la plage de pression.

Les composants devant être soumis à un essai d'étanchéité, cet essai doit être effectué avant l'essai de pression.

7.4.4.2 Essai de fuite vers l'extérieur

Un composant ne doit présenter aucune fuite par un joint de la tige ou du corps ou un autre joint quelconque, ni présenter de signes de porosité (défaut de fonderie) lorsqu'il est soumis aux essais décrits au paragraphe 7.4.4.3.3, sous toute pression de gaz comprise entre 0 et la PSMA.

L'essai doit être effectué sur le même matériel, 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 établir la stabilité thermique;
- c) À la température de fonctionnement maximale après une période de conditionnement suffisante pour établir la stabilité thermique.

Pendant l'essai, le matériel à l'essai doit être raccordé à une source de gaz sous pression. Une vanne d'arrêt complet et un manomètre ayant une plage de pression comprise entre 150 et 200 % de la pression d'essai doivent être installés dans la conduite de mise sous pression et la jauge doit avoir une précision de 1 % de la plage de pression. Le manomètre doit être placé entre la vanne d'arrêt complet et l'échantillon soumis à l'essai.

Tout au long de l'essai, l'échantillon, recouvert d'un agent tensioactif, ne doit présenter ni bulle ni fuite supérieure à 216 Nml/h.

7.4.4.3 Essai d'endurance

7.4.4.3.1 Un composant doit 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 d'étanchéité vers l'extérieur et d'étanchéité du siège, tels qu'ils sont 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 solide 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 soupape pendant un laps de temps au moins égal à 10 ± 2 s.

7.4.4.3.4 Le composant doit être actionné pendant 96 % du nombre de cycles prévus, à la température ambiante et à sa PSMA. Lors de la phase de fermeture, on doit laisser la pression aval du montage d'essai descendre jusqu'à 50 % de la PSMA du composant.

7.4.4.3.5 Le composant doit être actionné pendant 2 % du nombre total de cycles à la température maximale du matériau (-40 à +85 °C) après une période de conditionnement suffisante pour établir la stabilité thermique, à sa PSMA. 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), une fois terminés les cycles d'exposition à haute température.

7.4.4.3.6 Le composant est actionné pendant 2 % du nombre total de cycles à la température minimum du matériau (-40 à +85 °C) mais au minimum à la température de l'azote liquide, après une période de conditionnement suffisante pour établir la stabilité thermique, à sa PSMA. Le composant doit satisfaire aux prescriptions des paragraphes 7.4.4.2 et 7.4.4.9 à la température minimum prévue (-40 à +85 °C), une fois terminés les cycles d'exposition à basse température.

- 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 2 normes sont applicables.
- 7.4.4.5 Essai de résistance à la corrosion
- Les composants hydrogène en métal doivent satisfaire aux essais d'étanchéité définis aux paragraphes 7.4.4.2 et 7.4.4.9, après avoir été soumis pendant 144 h à un brouillard d'eau salée conformément à la norme ISO 9227, tous les raccords étant obturés.
- Les composants en cuivre ou en laiton en contact avec l'hydrogène doivent satisfaire aux essais d'étanchéité définis aux paragraphes 7.4.4.2 et 7.4.4.9, après avoir été plongés pendant 24 h dans un bain d'ammoniaque, conformément à la norme ISO 6957, tous raccords 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 à l'air, à une température égale à sa température de fonctionnement maximale pendant 168 h, pendant lesquelles sa résistance à la traction ne doit pas augmenter de plus de 25 %. Quant à son allongement à la rupture, il ne doit pas:
- augmenter de plus de 10 %,
 - ou diminuer de plus de 30 %.
- 7.4.4.7 Essai de vieillissement à l'ozone
- L'essai doit être effectué conformément à la norme ISO 1431-1. L'échantillon, qui doit subir une élongation sous contrainte de 20 %, doit 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 fissuration.
- 7.4.4.8 Essai de cycles de température
- Les composants hydrogène en matériaux non métalliques 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 allant de leur température de fonctionnement minimale à leur température de fonctionnement maximale, chaque cycle durant 120 min, à leur PSMA.
- 7.4.4.9 Essai de cycles sur les conduites flexibles
- Les conduites flexibles d'alimentation doivent satisfaire aux essais d'étanchéité pertinents visés au paragraphe 7.4.4.2, après avoir été soumis à 6 000 cycles de pression.
- La pression d'essai doit augmenter de la pression atmosphérique à la PSMA du réservoir en moins de 5 s et, après un délai d'au moins 5 s, redescendre à la pression atmosphérique en moins de 5 s.
- L'essai de fuite vers l'extérieur, défini au paragraphe 7.4.4.2, doit être effectué immédiatement après l'essai d'endurance.

7.5 Procédures d'essai pour la vérification de l'intégrité des systèmes de stockage de l'hydrogène liquéfié

7.5.1 Essai d'étanchéité après choc des systèmes de stockage de l'hydrogène liquéfié

Avant l'essai de choc, le système de stockage de l'hydrogène liquéfié doit être préparé comme suit:

- a) Dans le cas des véhicules qui n'en sont pas déjà équipés de série, qui doivent être soumis au paragraphe 6.1.1, il convient d'installer les équipements ci-dessous:
 - i) Un capteur de pression dont la valeur de mesure maximale est au moins égale à 150 % de la PSMA, d'une précision d'au moins 1 % de la plage de mesure maximale et capable de lire des valeurs d'au moins 10 kPa;
 - 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 dispositif 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 dispositif de stockage est rempli avec de l'azote à un niveau équivalent au niveau maximum de remplissage de l'hydrogène, en poids;
- d) Une fois le système rempli, l'évent (d'évacuation de l'azote) est obturé et on laisse au réservoir le temps de trouver sa pression d'équilibre;
- e) L'étanchéité du dispositif de stockage est vérifiée.

Lorsque le capteur de température et le capteur de pression indiquent respectivement que le système s'est refroidi et que sa pression s'est équilibrée, le véhicule est soumis aux essais de choc conformément à la réglementation en vigueur dans l'État ou au niveau régional. Pendant 1 h au minimum après l'essai de choc, aucune fuite visible d'azote gazeux ou liquide froid ne doit apparaître. De plus, le bon fonctionnement des détendeurs ou des dispositifs de décompression doit être démontré afin de prouver que le système de stockage de l'hydrogène liquéfié est protégé contre l'éclatement après le choc. Si le vide d'isolation dans le système de stockage est maintenu après le choc, de l'azote gazeux peut être ajouté dans le système, par l'orifice de remplissage ou de vidange jusqu'à ce que les détendeurs et/ou les dispositifs de décompression s'actionnent. Dans le cas de détendeurs ou de dispositifs de décompression à refermeture, il doit être démontré qu'ils peuvent effectuer au moins 2 cycles complets d'ouverture et refermeture. Les gaz d'évacuation provenant des détendeurs ou des dispositifs de décompression ne doivent pas être envoyés vers l'habitacle, le compartiment à bagages ou le compartiment de charge lors de ces essais après choc.

Une fois qu'il a été confirmé que les détendeurs et/ou les dispositifs de décompression sont toujours en état de fonctionnement, le système de stockage de l'hydrogène liquéfié doit être soumis à un essai d'étanchéité, conformément aux dispositions du paragraphe 6.1.1.1 ou du paragraphe 6.1.1.2.

L'essai décrit au paragraphe 7.5.1.1, ou l'essai alternatif décrit au paragraphe 7.5.1.2 (qui se subdivise en 7.5.1.2.1 et 7.5.1.2.2) peut être effectué pour démontrer qu'il est satisfait à l'essai prescrit au paragraphe 7.5.1.

7.5.1.1 Essai d'étanchéité des systèmes de stockage d'hydrogène liquéfié après 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 définies au paragraphe 7.5.1.2.2. Après avoir obtenu confirmation que les détendeurs et les dispositifs de décompression fonctionnent toujours, on peut démontrer l'étanchéité du système de stockage en examinant toutes les parties susceptibles de fuir à l'aide d'un détecteur de fuite à hélium 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 ne doit être 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) Les capots et autres panneaux et composants peuvent être enlevés pour donner accès aux endroits 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 des tuyaux et des composants se trouvant en aval du réservoir;
- c) Les soupapes;
- d) Les flexibles;
- e) Les capteurs.

Avant d'appliquer la surpression de l'essai d'étanchéité, le système de stockage devrait être remis à la pression atmosphérique, et par la suite il devrait être pressurisé avec de l'hélium jusqu'à la pression de fonctionnement, mais largement en dessous de la pression normale de consigne des dispositifs (de façon à éviter que les détendeurs ne s'actionnent pendant la période d'essai). L'essai est considéré comme réussi si la fuite totale (c'est-à-dire la somme de toutes les fuites détectées) est inférieure à 216 Nml/h.

7.5.1.2 Essais alternatifs des systèmes de stockage d'hydrogène liquéfié après choc

Les essais prescrits aux paragraphes 7.5.1.2.1 et 7.5.1.2.2 sont effectués conformément à la procédure définie au paragraphe 7.5.1.2.

7.5.1.2.1 Essai alternatif d'étanchéité après choc

Après avoir obtenu confirmation que les détendeurs et/ou les dispositifs de surpression sont toujours en état de fonctionnement, l'essai ci-dessous peut être effectué afin de mesurer l'importance des fuites après choc. L'essai de mesure de la concentration prescrit au paragraphe 6.1.1.1 doit être effectué en parallèle, pendant les 60 min de la période d'essai, si la concentration en hydrogène n'a pas été encore directement mesurée à la suite de l'essai de choc.

Le réservoir doit être ramené 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 sous vide.

Si la pression de consigne est inférieure à 90 % de la PSMA, le dispositif de décompression doit être désactivé pour empêcher qu'il ne s'actionne 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 5 fois son volume d'hélium;

ou

- b) Soit en pressurant et dépressurant le réservoir au moins 5 fois de suite.

Le système de stockage est ensuite rempli avec de l'hélium, à une pression de 80 % de la PSMA du réservoir ou à 10 % de moins que la valeur de consigne de la soupape de décompression primaire, si cette seconde valeur est moins élevée, et cette pression est maintenue pendant une période de 60 min. La perte de pression mesurée pendant ces 60 min doit être inférieure ou égale aux valeurs fixées ci-après, en fonction de la contenance en liquide 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 mais au maximum égale à 200 l; et
- c) 0,5 atm pour les systèmes dont la contenance dépasse 200 l.

7.5.1.2.2 Essai de mesure des concentrations dans les espaces fermés après choc

Les mesures relevées pendant l'essai d'étanchéité à l'hydrogène liquéfié (par. 7.5.1.2.1) si le système de stockage d'hydrogène liquéfié contient de l'hydrogène pour l'essai ou celles relevées pendant l'essai d'étanchéité à l'hélium (par. 6.1.2) doivent être consignées.

Il convient de choisir des capteurs capables de mesurer l'accumulation d'hydrogène ou d'hélium (selon le gaz qui est utilisé pour l'essai de choc dans le système de stockage. Ces capteurs peuvent mesurer soit la teneur en hydrogène ou en hélium de l'atmosphère à l'intérieur des compartiments soit la réduction de la teneur en oxygène due au déplacement de l'air par l'hydrogène ou l'hélium présent).

Les capteurs doivent être étalonnés sur la base de critères reconnus, avoir une précision de 5 % de la valeur de lecture pour une concentration en hydrogène de 4 % (essai avec de l'hydrogène liquéfié) ou une concentration en hélium de 0,8 % en volume dans l'air (dans le cas d'un essai à température ambiante avec de l'hélium), et avoir une valeur de mesure maximale d'au moins 25 % supérieure aux valeurs limites fixées. Ils doivent être capables de répondre à 90 % à une variation d'amplitude maximale de la concentration, en moins de 10 s.

L'installation sur les véhicules des systèmes de stockage d'hydrogène liquéfié doit satisfaire aux mêmes prescriptions que l'installation des systèmes de stockage d'hydrogène comprimé (par. 6.1.2). Les données fournies par les capteurs doivent être collectées au moins toutes les 5 s, et pendant une période de 60 min après que le véhicule se soit immobilisé s'il s'agit de mesurer l'accumulation d'hydrogène après choc, ou après le début de l'essai d'étanchéité avec l'hélium s'il s'agit de mesurer l'accumulation d'hélium jusqu'à 5 s glissantes, en moyenne, peuvent être appliquées aux valeurs de mesure aux fins de lissage et de filtrage des valeurs aberrantes. La moyenne mobile de chaque capteur doit être inférieure aux 4 % fixés pour l'hydrogène (dans le cas d'un essai avec de l'hydrogène liquéfié) ou au 0,8 % fixé pour l'hélium en volume dans l'air (dans le cas d'un essai avec l'hélium à température ambiante), à tout instant pendant les 60 min suivant le choc.
