GROUPE CSA[MC]




RECHERCHE SUR LES NORMES

# Faire progresser l'utilisation de l'hydrogène et l'électrification dans le secteur ferroviaire

mars 2024

## Auteurs

**Mohamed Hegazi,** Ph. D., DB E.C.O. North America Inc.

**Derek Wong,** Ing., DB E.C.O. North America Inc.

**Heather Aitken,** Ing., DB E.C.O. North America Inc.

**Andreas Hoffrichter,** Ph. D., DB E.C.O. North America Inc.


## Comité consultatif du projet

**Kyle Beauliua,** Transport Canada

**Matthew Findlay,** CPKC

**Manuel Hernandez,** Conseil national de recherches Canada

**Dragica Jeremic Nikolic,** Groupe CSA

**Mark Duda,** Groupe CSA

**Iris Monner,** Groupe CSA (chargée de projet)


## Remerciements

DB E.C.O. North America Inc. tient à remercier les membres du comité consultatif, les participants aux entrevues et les répondants au sondage pour leur importante et précieuse contribution. Ce rapport de recherche a été rendu possible grâce à la contribution financière de Transports Canada.



**Clause de non-responsabilité**

Cette étude a été réalisée par DB E.C.O. North America Inc. et est la propriété de l'Association canadienne de normalisation. Elle vise à fournir des renseignements de nature générale sur le sujet traité. Les opinions exprimées dans cette publication sont celles des auteurs et des personnes interrogées. DB E.C.O. North America Inc. et l'Association canadienne de normalisation ne sauraient être tenues responsables d'aucune perte ni d'aucun dommage pouvant résulter de votre utilisation du contenu de cette publication.

# Table des matières

**Sommaire** 4

**1 Introduction** 5

**2 Méthodologie** 7

**3 Contexte technologique** 8

**3.1 Force motrice ferroviaire zéro émission** 8

3.1.1 Propulsion à batterie 10

3.1.2 Propulsion à l'hydrogène 11

**4 Contexte actuel de normes et de codes** 15

**4.1 Lacunes précédemment identifiées dans la normalisation de l'hydrogène et des batteries** 15

**4.2 Examen du contexte actuel de normes et de codes** 17

4.2.1 Normes et codes globaux 17

4.2.2 Normes et codes spécifiques à l'infrastructure 20

4.2.3 Normes et codes spécifiques aux véhicules 23

**5 Possibilités d'élaboration de normes et de codes** 29

**5.1 Lacunes identifiées dans le contexte actuel** 29

5.1.1 Normes et codes globaux 30

5.1.2 Normes et codes spécifiques à l'infrastructure 31

5.1.3 Normes et codes spécifiques aux véhicules 35

**5.2 Feuille de route pour faire progresser la propulsion ZE** 42

5.2.1 Conception des composants et des sous-systèmes pour l'environnement ferroviaire 42

5.2.2 Résistance aux chocs 43

5.2.3 Ravitaillement en hydrogène 44

5.2.4 Recharge des batteries 44

5.2.5 Interopérabilité 44

**6 Conclusions** 45

**7 Références** 46

**Annexe A – Questions du sondage et de l'entrevue** 53

**Annexe B – Documents et règlements applicables** 55

# Sommaire

Les effets cumulés des changements climatiques et la pression mondiale qui en résulte pour réduire les émissions de gaz à effet de serre ont fait naître le besoin de faire progresser les technologies de propulsion zéro émission (ZE) dans tous les modes de transport. Les objectifs fédéraux canadiens et américains de réduction des émissions et les stratégies à long terme visant à décarboner le secteur des transports font de la propulsion ZE dans le secteur ferroviaire un élément de leurs plans d'action.

L'avancement, l'adoption généralisée de même que l'utilisation sécuritaire et fiable des technologies de propulsion ferroviaires ZE dépendent de l'élaboration de normes et de codes spécifiques à ces technologies fonctionnant dans un environnement ferroviaire. Ce rapport donne une vue d'ensemble du contexte actuel des codes et des normes applicables à deux des principales technologies de propulsion ZE : les piles à combustible à hydrogène et les batteries.

Dans un premier temps, les lacunes dans les codes et les normes en vigueur ont été identifiées grâce à un examen de ces codes et des normes applicables aux technologies ZE ainsi qu'à des entrevues avec des experts du secteur. À partir d'une analyse du contexte existant et de l'avis d'experts provenant de diverses sources du secteur, les lacunes ont été classées par ordre de priorité en fonction de leur importance et de leur urgence par rapport à l'avancement de la technologie ferroviaire ZE, et une feuille de route a été créée pour l'élaboration de normes et de codes applicables.

Les thèmes jugés les plus importants pour le développement de la normalisation sont la conception des composants et des sous-systèmes, la résistance aux chocs, le ravitaillement en hydrogène et le chargement des batteries. L'élaboration de normes et de codes relatifs à ces thèmes clés sera cruciale pour favoriser une utilisation sécuritaire et fiable de ces technologies de propulsion.




**« En 2021, le secteur ferroviaire canadien a émis 7,8 mégatonnes (Mt) d'équivalent de dioxyde de carbone ($CO_{2e}$), dont 98 % provenaient des activités de transport de marchandises [1]. Le transport ferroviaire canadien était également responsable de l'émission de plus de 79 000 tonnes d'oxydes d'azote ($NO_x$), soit 6 % des émissions totales de $NO_x$ du Canada cette année-là. »**

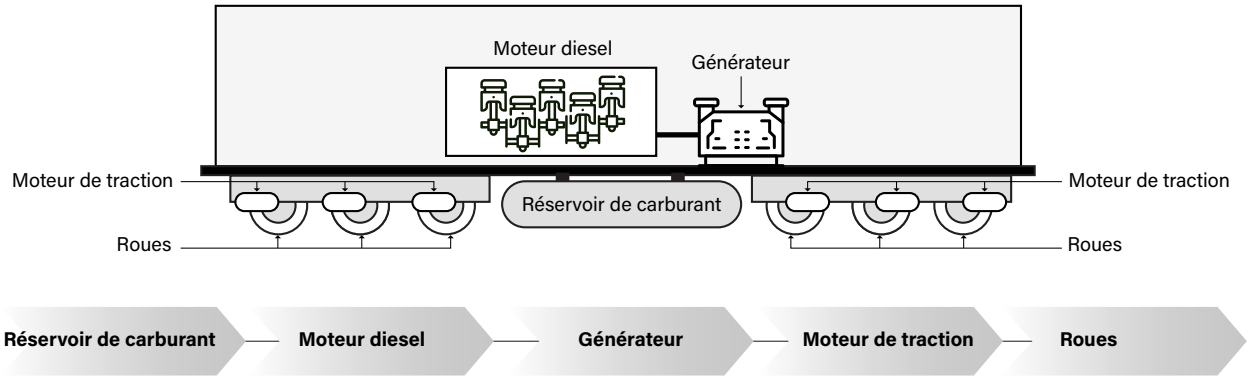
## 1 Introduction

À l'échelle mondiale, les effets des changements climatiques sont de plus en plus évidents, d'où la nécessité urgente de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) dans tous les secteurs. En 2021, le secteur ferroviaire canadien a émis 7,8 mégatonnes (Mt) d'équivalent de dioxyde de carbone ($CO_{2e}$), dont 98 % provenaient des activités de transport de marchandises [1]. Le transport ferroviaire canadien était également responsable de l'émission de plus de 79 000 tonnes d'oxydes d'azote ($NO_X$), soit 6 % des émissions totales de $NO_X$ du Canada cette année-là [3]. En 2020, le secteur ferroviaire américain a émis 34,2 Mt de $Co_{2e}$ [2]. Comme l'exige le *Règlement sur les émissions des locomotives*, les émissions des principaux contaminants atmosphériques (PCA) des locomotives sont fréquemment testées et déclarées. Pour faciliter la surveillance des émissions, Transports Canada (TC) a adopté les classifications par niveaux d'émissions des locomotives de l'Environmental Protection Agency (EPA) des États-Unis, lesquelles sont définies dans le titre 40, partie 1033 du Code of *Federal Regulations* (CFR) des États-Unis. La classification précise les niveaux maximaux d'émissions des principaux polluants que les locomotives pourraient produire en fonction de l'année de fabrication ou de remise à neuf du moteur. En 2020, environ 8,4 % du parc de locomotives du Canada était classé dans le niveau 4, soit la classification la plus propre (c.-à-d. la moins polluante) pour les locomotives diesel, et 0,3 % du parc n'était pas alimenté au diesel [4]. Les locomotives restantes (91,3 %) ne répondaient pas aux normes actuelles d'émissions les plus propres (c.-à-d. qu'elles polluaient davantage).

Les systèmes de propulsion à base de combustibles fossiles convertissent l'énergie chimique du combustible en énergie mécanique par combustion à l'aide d'un moteur. En fixant un générateur au moteur, l'énergie mécanique est ensuite convertie en énergie électrique (courant continu [CC] ou courant alternatif [CA]) qui alimente les moteurs de traction électrique. C'est pourquoi les locomotives à moteur diesel sont appelées locomotives diesels-électriques. Un diagramme montrant une locomotive diesel-électrique typique avec un schéma fonctionnel simplifié de son groupe motopropulseur est présenté à la figure 1. Les émissions de gaz d'échappement du moteur diesel étant la principale source d'émissions du secteur ferroviaire, de nouvelles technologies capables de fournir de l'électricité aux moteurs de traction sans créer d'émissions sont à l'étude.

Le Plan de réduction des émissions pour 2030 du gouvernement canadien vise à réduire les émissions du Canada de 40 % sous les niveaux de 2005 d'ici 2030 et à atteindre la carboneutralité d'ici 2050 [5]. Pour atteindre ces objectifs, le gouvernement canadien a créé une feuille de route sectorielle qui comprend l'élaboration d'un plan d'action de décarbonation du secteur ferroviaire visant la carboneutralité d'ici 2050 et qui pourrait inclure des « efforts pour faire progresser les locomotives à émission zéro et l'électrification des locomotives [5] ».

**Figure 1 :** Locomotive diesel-électrique avec groupe motopropulseur simplifié




Dans leur stratégie climatique à long terme, les États-Unis se sont engagés à réduire leurs émissions nettes de GES de 50 à 52 % sous les niveaux de 2005 d'ici 2030, et se sont fixé l'objectif d'atteindre la carboneutralité d'ici 2050 au plus tard [6]. La stratégie américaine identifie l'électrification de segments du réseau ferroviaire existant et la priorisation d'autres vecteurs énergétiques, y compris l'hydrogène, comme des éléments de sa stratégie de décarbonation, notant que « des mesures telles que le train à grande vitesse et le développement axé sur le transport en commun ne réduisent pas seulement les émissions, mais créent également des communautés plus connectées, plus accessibles et plus saines [6] ».

Le secteur ferroviaire canadien est prêt à poursuivre ses recherches et à faire preuve de leadership à l'échelle mondiale dans le développement de la propulsion ferroviaire zéro émission (ZE). La Stratégie canadienne pour l'hydrogène indique qu'en tant que nouvelle technologie, « les codes et normes existants présentent des lacunes qui doivent être comblées pour permettre l'adoption de l'hydrogène » [7]. Il est donc possible d'aider les secteurs ferroviaires canadien, américain et mondial à passer à la propulsion ZE en élaborant des codes et des normes pour la conception, les essais et la mise en œuvre de ces technologies dans un contexte ferroviaire.

La Federal Railroad Administration (FRA) des États-Unis et TC assument la responsabilité fédérale d'assurer le fonctionnement sécuritaire des chemins de fer. Pour ce faire, le régime de réglementation canadien exige la conformité aux normes acceptées par le secteur, parmi les outils réglementaires. Historiquement, ces règlements ne ciblent pas une source d'énergie spécifique, bien qu'ils supposent souvent implicitement le recours au carburant diesel en raison de son utilisation répandue. Les règlements définissent des méthodes d'essai et des critères de performance pour le matériel utilisé sur les chemins de fer réglementés par le gouvernement fédéral.

La FRA se prépare à l'utilisation éventuelle de la technologie ZE (p. ex., à l'hydrogène, à batterie) sur les chemins de fer américains. En 2013, la FRA a fait parvenir une lettre aux acteurs du secteur ferroviaire concernant les autres types de carburants, fournissant une liste des évaluations nécessaires [8]. À l'origine, cette liste se concentrait sur le gaz naturel, mais elle a depuis été mise à jour pour y inclure l'hydrogène. Actuellement, lorsque des projets d'introduction de nouveaux équipements ou de nouvelles technologies sont présentés, la FRA assure la surveillance des scénarios d'essais spécifiques et de l'utilisation des nouvelles technologies sur les chemins de fer réglementés par le gouvernement fédéral. Par exemple, la FRA peut assister à certains essais et en examiner les résultats avant d'autoriser l'utilisation de nouvelles technologies dans les espaces publics.

Pour alimenter la discussion sur l'adoption de ces nouvelles technologies dans un contexte ferroviaire, les

recherches se sont concentrées sur la littérature et la documentation existantes concernant les technologies de batterie et d'hydrogène pour les véhicules ferroviaires, et sur le matériel nécessaire pour alimenter les véhicules (p. ex., l'infrastructure de recharge ou de ravitaillement en carburant). Les normes et codes relatifs aux installations de production ou à d'autres infrastructures de chemin ainsi que les technologies de propulsion établies telles que les caténaires et les systèmes comprenant un troisième rail, n'entraient pas dans la portée de cette recherche.

L'objectif de ce rapport est de soutenir la participation du secteur ferroviaire dans la mise en œuvre et l'avancement des technologies de propulsion propres. Ce rapport fournira une feuille de route soutenue par le secteur détaillant des recommandations prioritaires et exploitables pour les normes et les codes les plus cruciaux pour la mise en œuvre des technologies de réduction des émissions par le secteur ferroviaire nord-américain.

## 2 Méthodologie

Les recherches sur lesquelles repose ce projet ont été menées dans le cadre de deux activités simultanées : l'élaboration d'une base de données des normes et codes applicables de même que la consultation des parties intéressées des secteurs ferroviaires et de la technologie ZE. Les activités ont été menées en parallèle. Les résultats de chaque activité ont guidé et influencé l'autre tout au long du projet, et les résultats des deux ont été combinés.

La base de données des normes et codes applicables a été développée en compilant un ensemble initial de titres de normes et de codes (avec leur champ d'application, lorsque disponible) provenant de plusieurs organismes d'élaboration de normes (OEN) et en examinant la littérature publiée, incluant les rapports de recherche pertinents. Un sous-ensemble de cet ensemble de données a été examiné manuellement. Des experts en la matière ont ainsi classé manuellement les codes et les normes de ce sous-ensemble comme étant applicables ou non applicables à la propulsion ferroviaire ZE. Un processeur de langage naturel (PLN) a été formé sur ce sous-ensemble classé manuellement (l'ensemble de données de formation). Le PLN entraîné a ensuite été utilisé pour examiner l'ensemble des données et identifier les normes et codes supplémentaires applicables à la propulsion ferroviaire ZE qui n'étaient pas inclus dans l'ensemble de données de formation. Les normes et codes applicables provenant de l'ensemble de données de formation et des données identifiées par le PLN ont constitué la base de données qui a ensuite été examinée manuellement et classée en fonction des sujets couverts par chaque document.

Les parties intéressées des secteurs ferroviaire et de la technologie ZE ont été interrogées afin de recueillir des informations et des avis sur les codes et les normes applicables à la propulsion ferroviaire ZE (voir l'annexe A). Les parties intéressées ont été invitées à identifier les lacunes dans la couverture des codes et des normes sur la base de leur expérience, ainsi que les sujets qui pourraient bénéficier d'une normalisation (indépendamment de leur perception d'une lacune). En plus des entrevues avec les parties intéressées, des sondages ont été menés. Dans le cadre de ces sondages, il a été demandé aux répondants d'identifier et de classer par ordre de priorité les lacunes dans les codes et les normes concernant les applications ferroviaires électrifiées à l'hydrogène et à batterie. Les normes applicables identifiées lors des entrevues et des sondages ont également été ajoutées à la base de données.

Les normes et codes applicables de la base de données, triés par thème et par domaine d'application, sont énumérés dans l'annexe B. La base de données triée a été utilisée pour vérifier si les lacunes identifiées par les parties intéressées étaient ciblées par les normes et codes existants, et pour aider l'identification de lacunes supplémentaires.

Les lacunes identifiées et confirmées par la base de données ont ensuite été évaluées en fonction de leurs répercussions sur l'avancement des technologies ZE dans le secteur ferroviaire et classées par ordre de priorité dans une feuille de route basée sur l'expérience interne et les contributions externes par le biais des entrevues, des résultats du sondage et d'un atelier réunissant les parties intéressées. La feuille de route qui en a résulté dresse une liste de sujets prioritaires pour l'élaboration de normes visant à soutenir l'avancement des technologies propres dans le secteur ferroviaire.

# 3 Contexte technologique

## 3.1 Force motrice ferroviaire zéro émission

Dans le contexte de la propulsion de véhicule, la technologie ZE fait référence au matériel capable de propulser le véhicule sans produire d'émissions d'échappement nocives. La portée de cette définition se limite au véhicule lui-même et ne tient pas compte des émissions créées en amont dans le processus de production d'énergie (p. ex., les émissions résultant de la production de l'électricité ou de l'hydrogène utilisé pour alimenter le véhicule).

Pour alimenter les moteurs de traction en électricité sans produire d'émissions d'échappement, un ou plusieurs des systèmes suivants sont utilisés :

- stockage de l'énergie à bord du véhicule (p. ex., batteries) ;
- production d'électricité à bord du véhicule (p. ex., à l'aide de piles à combustible à hydrogène) ; et
- transmission continue d'électricité depuis l'infrastructure de chemin jusqu'au véhicule (p. ex., à l'aide d'une caténaire).

Les systèmes décrits, illustrés aux figures 2 à 4, remplacent le moteur diesel et le réservoir de carburant des locomotives diesels-électriques traditionnelles illustrées à la figure 1. Il convient de noter qu'en plus de la technologie ZE, il existe des technologies à faibles émissions qui incluent certaines des technologies déjà examinées, telles que les hybrides diesel-batterie électrique. Étant donné que le système de propulsion diesel est déjà bien établi et que la partie batterie de ces systèmes est équivalente à la version hybride d'une pile à combustible, l'hybridation des technologies à faibles émissions, en particulier les batteries, est traitée dans la section 3.1.1 de ce rapport.

Les technologies utilisant des batteries et de l'hydrogène n'en étant qu'aux premiers stades d'un déploiement à grande échelle dans le secteur ferroviaire, elles font l'objet du présent rapport.

L'introduction de technologies utilisant des batteries et de l'hydrogène dans un contexte ferroviaire mène à la nécessité d'une variété de nouveaux codes et de nouvelles normes pour aborder des sujets essentiels à leur adoption et à leur mise en œuvre généralisées, et pour favoriser des opérations sécuritaires et efficaces. Par exemple, bien que les technologies utilisant des batteries et de l'hydrogène aient été employées dans d'autres contextes (p. ex., alimentation électrique fixe, automobile), la mise en œuvre dans un environnement ferroviaire fait intervenir de nouveaux environnements d'exploitation et, potentiellement, un besoin pour des systèmes plus grands et plus puissants. Ces nouvelles possibilités d'utilisation nécessitent des codes et des normes qui prennent en compte les considérations spécifiques au secteur ferroviaire telles que la conception des composants et des systèmes de même que les exigences en matière d'essais qui tiennent compte de l'environnement d'exploitation ferroviaire. En général, l'environnement d'exploitation ferroviaire comprend, entre autres, les éléments suivants :

- des températures fluctuantes ;
- des variations d'altitude ;
- des chocs et des vibrations mécaniques ;
- des environnements d'exploitation intérieurs, extérieurs, surélevés et souterrains ;
- une exposition à des espaces publics, à des routes et à d'autres véhicules ;
- une proximité avec des équipements lourds, des substances dangereuses et volatiles, et des systèmes à haute tension ;
- un risque de décharges électriques, de vandalisme, d'inondations, d'incendies, d'explosions et de foudre ;
- un risque d'implication dans des collisions et des déraillements ; et
- un risque d'être la cible d'activités criminelles (y compris des cyberattaques).

Les risques associés au transport ferroviaire, y compris le transport de marchandises dangereuses et la grande quantité de masse et d'énergie transportée par les trains, sont aggravés par les facteurs de l'environnement d'exploitation ferroviaire énumérés ci-dessus.

**Figure 2 :** Locomotive hybride munie de piles à combustible à hydrogène avec groupe motopropulseur simplifié

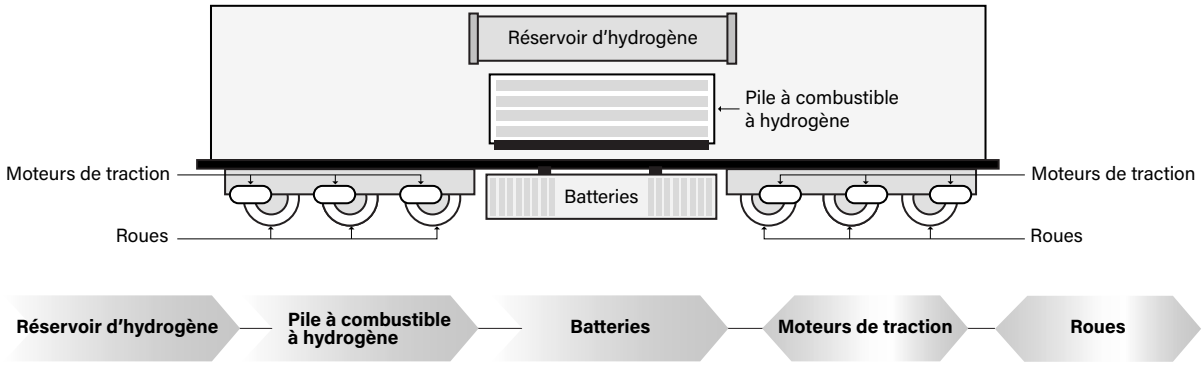



**Figure 3 :** Locomotive hybride munie d'un moteur à combustion d'hydrogène et d'une batterie avec groupe motopropulseur simplifié

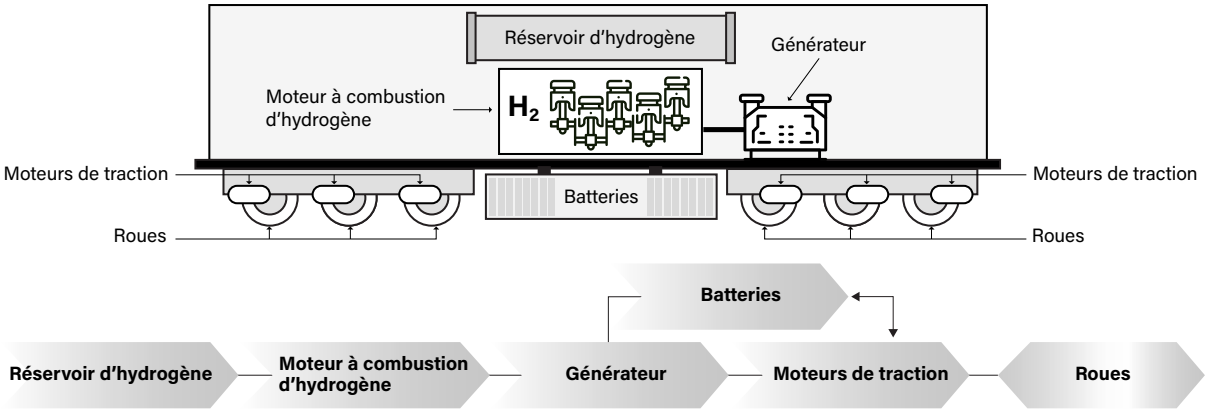
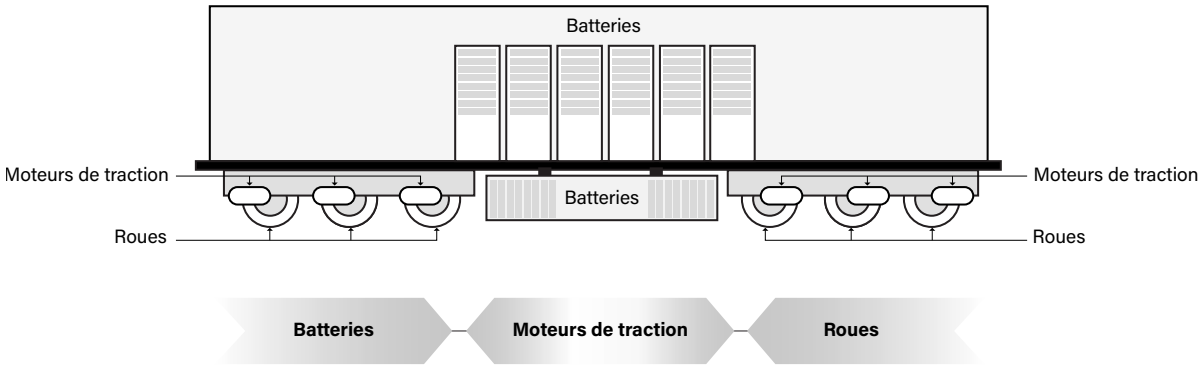



**Figure 4 :** Locomotive électrique munie d'une batterie avec groupe motopropulseur simplifié



### 3.1.1 Propulsion à batterie

L'utilisation de batteries rechargeables comme systèmes de stockage d'énergie (SSE) dans les systèmes de traction est de plus en plus répandue dans le secteur automobile, sous la forme de véhicules hybrides électriques (VHE) ou de véhicules électriques à batterie (VEB). Des fabricants de locomotives comme Wabtec [11] et Progress Rail [12] ont annoncé leur intention de produire des locomotives électriques à batteries pour le secteur du transport de marchandises et ont déjà mis en œuvre des prototypes, ce qui témoigne de la viabilité des locomotives électriques à batteries et de l'intérêt général qu'elles suscitent sur le marché. D'autres fabricants, dont Stadler, Siemens, Alstom, Tig-M et Brookville, ont déjà commencé à produire des véhicules de transport en commun alimentés avec des batteries [13, 14, 15, 16, 17], dont certains sont déjà en service en Amérique du Nord. Par exemple, le service de tramway QLine à Détroit fonctionne grâce à une combinaison d'électrification par voie aérienne, de biberonnage et de recharge par branchement [18].

Les batteries ont été adoptées dans certains systèmes légers sur rail pour passagers [16, 17], mais elles ont été peu mises en œuvre dans le secteur du transport lourd en raison d'exigences énergétiques beaucoup plus élevées. De plus, les véhicules ferroviaires connaissent souvent des taux d'utilisation plus élevés que ceux des véhicules routiers de passagers, et peuvent donc être soumis à davantage de restrictions concernant les longs temps de recharge, car cela pourrait avoir des répercussions sur les revenus. Toutefois, les progrès réalisés dans le secteur technologique de la batterie aux ions lithium ont permis d'augmenter la densité d'énergie et de puissance, et de réduire le temps de charge, ce qui indique que les technologies de batteries s'appliquent de mieux en mieux à une utilisation dans le secteur du transport lourd.

L'intérêt croissant pour les technologies utilisant des batteries s'accompagne d'une recherche d'améliorations des compositions chimiques d'ions lithium, qui dominent actuellement les applications de traction [19] (p. ex., les compositions chimiques de lithium-nickel-manganèse-cobalt-oxyde [NMC]), et les autres compositions chimiques, qui dépendent moins de matériaux coûteux tels que le lithium, le nickel et le cobalt (p. ex., les compositions chimiques d'ions sodium) [20]. Actuellement, les solutions de remplacement des ions lithium, comme les ions sodium, ont encore à atteindre des densités d'énergie équivalentes à celles des batteries aux ions lithium et ne sont pas encore exploitées commercialement dans un environnement automobile [20], ce qui les rend moins susceptibles d'être adaptés pour une utilisation ferroviaire dans un avenir proche. C'est pourquoi le présent rapport se concentre sur le potentiel des batteries aux ions lithium pour les applications de traction.

En raison de facteurs inhérents à la composition chimique des batteries, la tension de chaque élément de batterie est souvent trop faible pour être utile dans les applications de traction [21]. Pour surmonter cette limitation, les piles sont souvent regroupées en modules, en chaînes et en blocs. Bien qu'il n'existe pas de définition normalisée, un module de batterie est souvent constitué de piles connectées en série ou en parallèle, ou les deux, avec des connexions soudées et emballées ensemble dans un conteneur. Les modules de batterie connectés en série forment une chaîne. En général, une chaîne contient suffisamment de modules pour répondre aux exigences de tension de l'architecture spécifique du groupe motopropulseur. Plusieurs chaînes connectées en parallèle forment un bloc-batterie.

Les blocs-batteries destinés aux applications de propulsion montrent souvent des tensions élevées (p. ex., 400 à 800 V [22, 23, 24]). Il faut donc considérer qu'ils présentent un risque d'électrocution pouvant entraîner des blessures ou la mort [25]. En raison des tensions élevées de ces systèmes, une attention particulière doit être accordée à la conception électrique des batteries afin d'éviter les risques électriques tels que les courts-circuits. Ceci est particulièrement important dans le cas des véhicules ferroviaires, et surtout pour les anciennes locomotives de transport de marchandises, car leurs structures extérieures conduisent souvent l'électricité, ce qui peut augmenter le risque de décharge électrique. Pour atténuer les risques électriques associés aux blocs-batteries chargés, la mise à la terre et la liaison sont utilisées pour s'assurer qu'un contact accidentel avec le système n'introduit pas un nouveau chemin de moindre résistance.

Les piles individuelles d'une même composition chimique et d'un même format peuvent présenter d'infimes variations entre elles en raison des tolérances de fabrication dans le processus de fabrication. Bien que ces variations soient généralement mineures, elles pourraient entraîner un déséquilibre du comportement de charge-décharge entre les piles, certaines pouvant subir une surcharge et d'autres une sous-charge, ce qui risquerait d'entraîner une dégradation plus rapide de ces piles que celles du reste du groupe. Dans certaines situations, la surcharge d'une pile pourrait provoquer un incendie de la pile, lequel pourrait se propager à d'autres piles du groupe, entraînant une cascade de combustion de la batterie [26]. Un système de gestion de la batterie (SGB) est souvent utilisé pour équilibrer la charge entre les piles et pour déconnecter et isoler électriquement n'importe quelle partie du groupe de batteries avant l'apparition de conditions dangereuses.

Les réactions chimiques à l'intérieur des piles sont généralement sensibles aux températures ambiantes [27]. En fonction de la composition chimique des piles, des conditions climatiques froides réduisent généralement la puissance de sortie et limitent souvent la charge, voire la bloquent complètement. Des températures plus élevées réduisent souvent la durée de vie des batteries et augmentent le risque d'incendie. C'est pourquoi les batteries destinées aux applications de traction nécessitent souvent des systèmes de gestion thermique. Un système de gestion thermique de la batterie (SGTB) régule la température du groupe de batteries et assure un fonctionnement sécuritaire. Les locomotives électriques à batterie présentent un défi assez unique du point de vue de la gestion thermique, car elles pourraient contenir jusqu'à deux mégawattheures (MWh) d'énergie stockée, ce qui est suffisant pour alimenter un ménage canadien moyen pendant environ un mois. La taille même du groupe de batteries peut mettre en évidence l'importance de la régulation thermique des batteries pour garantir la sécurité des opérations. De plus, si ces locomotives doivent être utilisées dans des climats froids comme celui du Canada, il est essentiel que le système de régulation thermique veille continuellement à ce que les piles ne soient pas soumises à des conditions de froid extrême.

Les batteries aux ions lithium présentent des défis supplémentaires du point de vue de la sécurité incendie en raison de leur susceptibilité à l'emballement thermique, de leur combustion rapide et de leur capacité à se rallumer [28, 19]. L'emballement thermique risque de se produire lorsque la température d'une pile à l'intérieur de la batterie dépasse un certain seuil. À mesure que la température de la pile augmente, elle atteint un point de défaillance et commence à émettre des gaz chauds et d'autres produits chimiques nocifs qui pourraient déclencher une réaction en chaîne, entraînant par le fait même une augmentation de la température des piles voisines, une défaillance de la pile et un incendie dans l'ensemble du bloc-batterie. Avec l'émission de gaz chauds des piles individuelles, la pression interne de la batterie peut augmenter et accroître le risque d'explosion [19]. L'emballement thermique pourrait résulter d'un dommage mécanique (perforation ou pénétration de la pile), électrique (court-circuit) ou thermique (conditions ambiantes trop chaudes). Les systèmes d'alerte précoce et les agents efficaces pour éteindre des incendies de batteries aux ions lithium sont toujours en développement ou sont mal compris, et constituent des domaines de recherche actifs [29, 19]. Souvent, les gaz émis s'avèrent toxiques et il convient de prendre des mesures appropriées pour atténuer les risques (p. ex., les espaces clos pourraient être soumis à un contrôle de la température, disposer d'un système de ventilation et, éventuellement, de murs coupe-feu).

### 3.1.2 Propulsion à l'hydrogène

Cette section donne un aperçu des composants qui constituent un groupe motopropulseur muni d'une pile à combustible à hydrogène.

#### 3.1.2.1 Hydrogène

L'hydrogène est l'élément le plus léger et le plus commun de l'univers. Il forme un gaz incolore, inodore et de faible densité aux températures et aux pressions atmosphériques [30]. Son potentiel est prometteur en tant que carburant pour les transports en raison de son énergie spécifique élevée (c.-à-d. l'énergie par unité de masse). Le contenu énergétique d'un kilogramme d'hydrogène est près de trois fois supérieur à celui du diesel [31].




**« Le contenu énergétique d'un kilogramme d'hydrogène est près de trois fois supérieur à celui du diesel. »**

Toutefois, l'utilisation de l'hydrogène comme carburant est limitée, notamment en raison de sa faible densité d'énergie (c.-à-d. l'énergie par unité de volume). Un kilogramme d'hydrogène à température et à pression atmosphériques (TPA) occupe un volume environ 10 000 fois supérieur à celui d'un kilogramme de diesel [32, 33]. Cela signifie que la densité d'énergie de l'hydrogène est environ 3 600 fois inférieure à celle du diesel.

Afin d'être utilisé comme carburant compte tenu de ces propriétés physiques, l'hydrogène doit soit être comprimé pour former un gaz sous pression, soit être refroidi jusqu'à l'état liquide, soit être combiné à d'autres molécules afin d'être stocké dans d'autres compositions chimiques.

### 3.1.2.2 Stockage de l'hydrogène

L'hydrogène est généralement stocké à bord des véhicules sous forme de gaz comprimé dans des réservoirs à une pression de 35 MPa ou 70 MPa [34]. Pour les utilisations fixes en grandes quantités, l'hydrogène est généralement entreposé sous forme liquide à la pression atmosphérique. Sous forme liquide, il faut maintenir l'hydrogène à une température égale ou inférieure à sa température d'ébullition, de -252,85 °C (-423 °F) pour éviter qu'il ne passe à l'état gazeux. En raison de sa densité d'énergie élevée dans cet état, l'hydrogène est généralement transporté sous forme liquide, en particulier lorsqu'il faut en transporter de grandes quantités [35]. Les secteurs de l'aérospatiale, de l'industrie lourde et de l'automobile ont déjà testé l'utilisation de l'hydrogène liquide comme carburant et l'ont intégré dans leur système de stockage embarqué [36, 37]. Cependant, la basse température de l'hydrogène liquide en fait une option beaucoup plus complexe et dangereuse en tant que carburant [38]. Certains composés riches en hydrogène, tels que l'ammoniac ou les hydrures métalliques, peuvent être utilisés comme méthode de stockage chimique. Ces technologies sont principalement au stade de la recherche et du développement, et font l'objet de nombreuses initiatives de développement et d'avancement financées par le gouvernement [39].

Une recherche et une sélection minutieuses des matériaux choisis pour le stockage de l'hydrogène s'imposent. La petite taille de l'atome d'hydrogène lui permet de pénétrer dans la plupart des matériaux métalliques et des alliages et de s'y dissoudre, ce qui modifie les propriétés des matériaux et réduit ultimement leur ductilité et leur capacité de charge – un phénomène appelé fragilisation par l'hydrogène [40] qui est particulièrement important en cas d'exposition prolongée à l'hydrogène, comme dans les réservoirs.

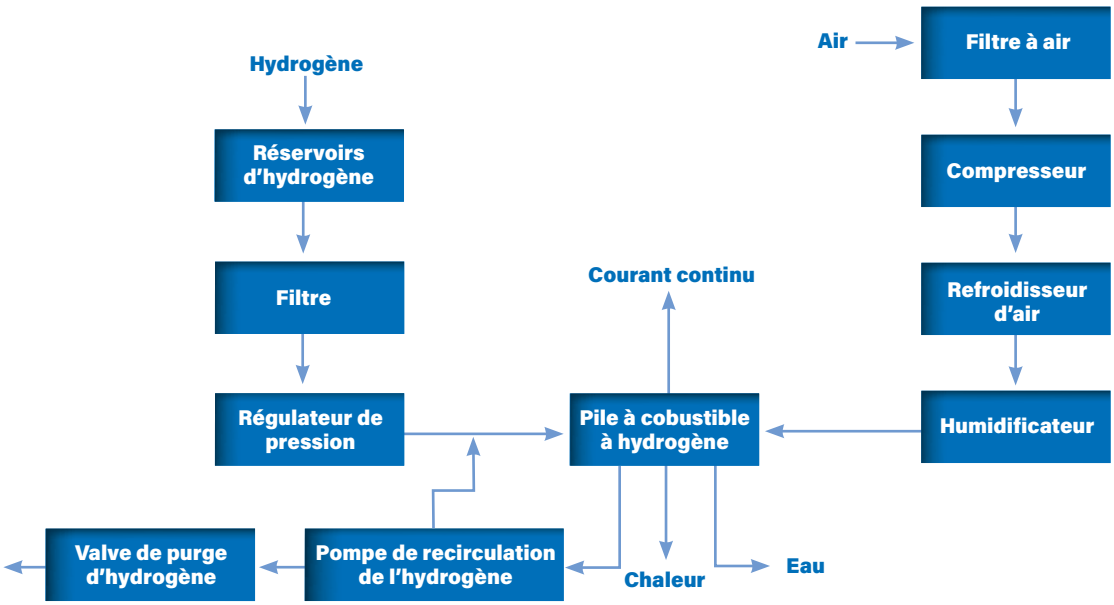
En raison de la différence entre les propriétés physiques de l'hydrogène et celles du diesel, les réservoirs à hydrogène des véhicules ferroviaires nécessiteront des conceptions, des essais et des emplacements à l'intérieur des véhicules très différents, qui requerront tous des codes et des normes.

### 3.1.2.3 Piles à combustible à hydrogène

Les piles à combustible (PAC) à hydrogène combinent l'hydrogène et une source d'oxygène (provenant généralement de l'air ambiant) en présence de catalyseurs pour créer une réaction exothermique, ce qui signifie que de l'énergie est libérée au cours du processus [41]. Une partie de cette énergie est libérée sous forme de chaleur et une autre sous forme d'électricité qu'il est possible d'utiliser pour charger une batterie ou alimenter un moteur électrique (voir la figure 5). Dans l'ensemble, les entrées dans la PAC à hydrogène sont l'hydrogène et l'oxygène, et la principale sortie est l'énergie électrique. Le processus chimique entraîne également la formation d'eau (généralement sous forme de vapeur) et de chaleur, qui sont considérées comme des sous-produits du processus de production d'énergie. Les PAC à hydrogène n'émettent pas de GES ni d'autres polluants atmosphériques.

Il existe différents types de PAC à hydrogène, la principale différence entre eux résidant dans les matériaux (p. ex., catalyseurs, électrolytes, etc.) utilisés dans la PAC à hydrogène. Les différentes combinaisons de matériaux sont associées à diverses caractéristiques de fonctionnement (p. ex., température de fonctionnement, efficacité, temps de démarrage, sensibilité aux impuretés du combustible) et des cas d'utilisation idéale. Le Department of Energy des États-Unis a produit une fiche d'information détaillant et comparant les types de piles à combustible les plus courants [42]. À ce jour, le type de PAC à hydrogène le plus couramment utilisé dans les applications de transport est la pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC), également appelée pile à combustible à membrane électrolytique polymère [43], principalement en raison de ses températures de fonctionnement relativement basses (-40 °C à 120 °C) et de ses rendements élevés (jusqu'à environ 65 % à ce jour), de sa densité de puissance élevée et de son évolutivité [44]. Les PEMFC nécessitent de l'hydrogène ultra pur comme combustible [45], ce qui explique la mise au point de normes et de méthodes d'essai de la qualité de l'hydrogène (SAE J2719, ISO 14687) pour faciliter la mise en œuvre des PAC à hydrogènes en tant que système d'alimentation fiable.

**Figure 5 :** Système de piles à combustible et équipements auxiliaires associés



Les PEMFC sont plus faciles à utiliser à grande échelle, car elles peuvent être combinées en piles, ce qui permet de partager les entrées de réactifs et de connecter en série les sorties électriques. Pour contrôler les PAC à hydrogène et surveiller leur fonctionnement, un système d'équipements auxiliaires – des composants auxiliaires qui soutiennent la production d'électricité des PAC à hydrogène – est associé aux PAC à hydrogènes. Les principaux objectifs du système d'équipements auxiliaires sont les suivants :

- garantir que les réactifs sont fournis aux PAC à hydrogène à la température, à l'humidité et à la pression optimales ;
- refroidir les piles ;
- éliminer l'eau qui se forme dans les PAC à hydrogène; et
- contrôler les PAC à hydrogène [46].

Ces systèmes comprennent un dispositif de circulation et de contrôle des gaz, des compresseurs, des échangeurs de chaleur, des humidificateurs, des systèmes de conditionnement de l'énergie et un dispositif de contrôle électronique comme le décrivent des normes telles que SAE J2616. Les fabricants combinent généralement les PAC à hydrogène et les équipements auxiliaires en un seul module, lequel est catégorisé selon le niveau de puissance nette (p. ex., en kilowatts). La conception et l'intégration des modules dans le véhicule sont primordiales au fonctionnement des PAC à hydrogène et constituent une raison essentielle à la normalisation dans un environnement ferroviaire.

#### 3.1.2.4 Combustion de l'hydrogène

Il est possible d'utiliser l'hydrogène comme carburant dans les moteurs à combustion interne (MCI), soit seul dans un moteur à combustion interne d'hydrogène (MCIH) [47, 48], soit sous forme d'un mélange dans un moteur à combustion interne à double carburant diesel-hydrogène (MCIDH) [49].

Il est possible de créer des MCIDH en convertissant des moteurs diesels existants et en ajoutant des réservoirs de stockage de l'hydrogène embarqués [49]. Étant donné que la locomotive existante et certains de ses composants seraient conservés, cette option technologique pourrait constituer un moyen de réduire les émissions et de maintenir les locomotives existantes en service pendant leur durée de vie prévue. Il est à noter que l'hydrogène utilisé pour la combustion n'a pas besoin d'être ultra pur [49], contrairement à l'hydrogène ultra pur requis pour une utilisation dans une pile à combustible, comme nous l'avons vu précédemment. Il a été démontré que les émissions de dioxyde de carbone ($CO_2$) des MCIDH sont jusqu'à 86 % inférieures à celles des moteurs diesels préexistants non convertis [49]. Leur incidence sur d'autres émissions, telles que les oxydes d'azote ($NO_x$), est moins claire, les recherches publiées indiquant que la technologie peut produire moins ou significativement plus d'émissions de NOx qu'un moteur comparable fonctionnant uniquement au carburant diesel, en fonction de facteurs comme la charge du moteur [50]. Étant donné que les MCIDH brûlent toujours du diesel et produisent des émissions, ils ne sont pas considérés comme une technologie ZE.

La combustion de l'hydrogène dans les MCIH ne devrait théoriquement pas produire de $CO_2$, de monoxyde de carbone (CO) ou de particules [47, 48], bien que de petites quantités de ces émissions puissent être produites par la combustion des lubrifiants utilisés dans le moteur. Mécaniquement, les MCIH sont similaires aux moteurs à combustion interne au diesel [47], avec des modifications apportées pour tenir compte des différences entre l'hydrogène et le diesel en matière d'alimentation en carburant, d'allumage et d'exigences de combustion. Dans les applications ferroviaires, les MCIH pourraient remplacer les moteurs diesels. Le stockage de l'hydrogène serait alors nécessaire au lieu des réservoirs de carburant diesel.

#### 3.1.2.5 Systèmes de propulsion hybrides

Comme pour les moteurs à combustion interne, l'efficacité des PAC à hydrogène varie en fonction de la charge appliquée. Le démarrage après un arrêt, l'accélération en cours de route et la prise d'altitude sont autant de facteurs qui augmentent la charge sur l'alimentation électrique. Plus précisément, la charge dynamique a un effet négatif sur l'efficacité [51] et la durée de vie des PAC à hydrogène, ce qui

signifie qu'elles ne constituent pas des sources idéales d'alimentation directe pour les moteurs de traction. C'est la raison pour laquelle les PAC à hydrogènes sont généralement combinées avec des SSE tels que des batteries, qui sont capables de gérer des charges dynamiques et de servir de tampons pour les PAC à hydrogène. Cette configuration permet au système de PAC à hydrogène de fonctionner efficacement sans limiter la puissance fournie aux moteurs de traction. Le jumelage de PAC à hydrogène et de batteries a été employé dans des applications de transport ferroviaire de passagers [52] et de marchandises [53], ainsi que dans des applications de véhicules lourds routiers [54]. Dans cette configuration, l'énergie de propulsion provient de l'hydrogène, qui alimente la PAC à hydrogène. Cette dernière produit de l'électricité qui est utilisée pour charger les batteries et propulser le véhicule. Les batteries, chargées par la PAC à hydrogène, répondent aux exigences de puissance dynamique pour déplacer le véhicule, y compris lors de l'accélération et de la montée des pentes, lorsque davantage de puissance est nécessaire.

Autre avantage : les batteries permettent de capter et de réutiliser l'énergie de freinage qui, autrement, serait dissipée et perdue sous forme de chaleur. Grâce à un processus connu sous le nom de freinage par récupération, il est effectivement possible d'inverser le flux d'électricité à l'intérieur du système de propulsion. L'énergie cinétique du véhicule est captée par les moteurs de traction (le mouvement mécanique de l'essieu fait tourner le moteur de traction, qui agit comme un générateur) pour produire de l'électricité qui est envoyée dans les batteries. Alors que les locomotives diesels-électriques traditionnelles ont la possibilité d'utiliser leurs moteurs de traction pour freiner, il n'y a rien à bord du véhicule pour stocker l'électricité, qui est donc dirigée vers un réseau de résistances et dissipée sous forme de chaleur perdue. Avec un SSE, il est possible de stocker et de réutiliser l'énergie captée lors du freinage, ce qui rend l'ensemble du système plus efficace. Les groupes motopropulseurs hybrides sont également susceptibles d'être constitués de moteurs diesels et de batteries pour des raisons similaires à celles invoquées pour les PAC à hydrogène, à savoir l'amélioration de l'efficacité et la réduction des émissions. La voiture Toyota Prius est un exemple de véhicule hybride à moteur à combustion, et certains véhicules hybrides à moteur diesel ont été déployés dans le secteur ferroviaire [55].

#### 3.1.2.6 Ravitaillement en hydrogène

Pour utiliser l'hydrogène comme carburant pour les véhicules ferroviaires, il est nécessaire de disposer d'un système permettant de transférer l'hydrogène à l'intérieur et à l'extérieur du véhicule. L'hydrogène est généralement stocké en grandes quantités sous forme de liquide ou de gaz, mais il peut être stocké à bord des véhicules dans un état différent de celui dans lequel il est stocké en vrac. La conception du système de ravitaillement dépendra à la fois du type de stockage en vrac et des méthodes de stockage embarquées (p. ex., gaz à 35 MPa ou à 70 MPa ou liquide). L'objectif de ces systèmes est de transférer l'hydrogène de son état de stockage en vrac à l'état utilisé à bord du véhicule, en tenant compte des changements d'état, de pression, de température, etc.

Au-delà de la sélection et du dimensionnement des composants spécifiques, l'installation et l'environnement de fonctionnement des systèmes de distribution constituent également des enjeux de sécurité pour lesquels des normes sont en cours d'élaboration. Voir les sections 4.2.2.2 et 4.2.3.8 pour plus de détails.

# 4 Contexte actuel de normes et de codes

## 4.1 Lacunes précédemment identifiées dans la normalisation de l'hydrogène et des batteries

Une revue de la littérature récente a été réalisée en lien avec les codes et les normes applicables à la technologie ferroviaire de l'hydrogène et des batteries, et les lacunes potentielles de couverture ayant été constatées [7]. La revue de la littérature comprenait non seulement des rapports portant sur le contexte de normalisation publiés par le Conseil national de recherches du Canada (CNRC) et axés sur l'utilisation de l'hydrogène dans plusieurs applications [56] de même que sur les applications spécifiquement ferroviaires de l'hydrogène et des batteries [57], mais également des rapports des organismes de sécurité

ferroviaire des États-Unis et du Royaume-Uni [58, 59]. Ces rapports ont permis de mieux comprendre les normes et codes pertinents publiés par les OEN du monde entier et d'identifier les lacunes en matière de normalisation pour l'utilisation de l'hydrogène et des batteries dans les applications ferroviaires

Le besoin d'harmonisation des codes et des normes entre les régions, l'entretien des réservoirs d'hydrogène, les buses de ravitaillement et les dispositifs de sécurité ont été identifiés comme des lacunes dans le rapport qui se concentre sur l'ensemble de la chaîne de valeur de l'hydrogène, de la production à l'utilisation, et le transport ferroviaire a été abordé à la fois comme méthode de transport de l'hydrogène en vrac et dans le cas d'une utilisation avec des véhicules ferroviaires fonctionnant à l'hydrogène [56]. Le rapport indique qu'en raison de l'absence de normes sur l'hydrogène spécifiques au transport ferroviaire, des normes globales sur l'hydrogène sont souvent citées en référence.

Des lacunes dans les normes et codes globaux, spécifiques aux véhicules, aux infrastructures et autres ont été identifiées dans un rapport sur les normes relatives aux applications ferroviaires alimentées à l'hydrogène et aux batteries [57]. Les capteurs d'hydrogène, les limiteurs de pression, les systèmes d'alarme incendie, les compresseurs d'air et les compresseurs d'hydrogène ont été identifiés comme des zones lacunaires dans les normes et codes globaux. Les distributeurs d'hydrogène ont été identifiés comme une zone lacunaire en ce qui concerne les normes et les codes d'infrastructure. Les systèmes de stockage de l'hydrogène et les composants associés, les systèmes d'alimentation des piles à combustible, les systèmes de ventilation, les échangeurs de chaleur et les systèmes de traitement de l'eau ont été identifiés comme des zones lacunaires en ce qui concerne les normes et les codes pour les véhicules. Les batteries et le transport de masse ont été identifiés comme d'autres zones présentant des lacunes en matière de normes et de codes. Ce rapport porte spécifiquement sur le transport ferroviaire et se concentre sur les applications canadiennes et nord-américaines. Il souligne la nécessité de prendre en compte les risques qui pourraient être accrus au Canada, notamment en raison des conditions hivernales. Ventilation, hydrogen fuel tank location, vibration and La ventilation, l'emplacement des réservoirs d'hydrogène, les essais de vibration et de choc, le ravitaillement en carburant (y compris la protection contre les mouvements involontaires et les dispositifs de sécurité), la compatibilité des matériaux avec l'hydrogène ainsi que les phénomènes physiques résultant des différences entre l'hydrogène et le diesel ont été signalés comme des zones lacunaires dans les normes et les codes relatifs aux véhicules ferroviaires fonctionnant aux PAC à hydrogène aux États-Unis [58]. Ce rapport porte spécifiquement sur le transport ferroviaire et se concentre sur les normes publiées par l'Association of American Railroads (AAR), tout en faisant référence aux normes du National Fire Protection Association (NFPA) parmi d'autres normes applicables aux États-Unis.

L'emplacement des piles à combustible, l'interface du véhicule, la sécurité et l'évacuation des passagers, la sécurité en cas d'incendie et d'explosion, la mise à la terre, le stockage de l'hydrogène, la détection des fuites, la ventilation, le ravitaillement en carburant et la reprise de carburant, la cybersécurité du système, la signalisation ainsi que les procédures d'exploitation ont été identifiés comme des zones où il existe des lacunes dans les codes et les normes applicables aux véhicules, principalement aux véhicules ferroviaires fonctionnant aux PAC à hydrogène au Royaume-Uni [59]. Le stockage de l'hydrogène hors du véhicule, la gestion des incidents et les interventions d'urgence, ainsi que la conception de l'infrastructure ont été identifiés comme des zones présentant des lacunes dans les normes et les codes relatifs à l'infrastructure. Ce rapport porte spécifiquement sur le transport ferroviaire et se concentre sur le Royaume-Uni et l'Europe.

En plus de la littérature examinée, des travaux antérieurs dans les domaines des codes et des normes portant sur l'hydrogène [60] et les batteries [61] ont permis le développement de bases de données accessibles au public. Au moment de la rédaction du présent rapport, ces bases de données contenaient environ 900 titres de normes. Aucune de ces bases de données n'a fourni d'analyse des lacunes. Cependant, il a été noté que l'élaboration de normes et de codes est nécessaire pour assurer la sécurité lors de l'utilisation de l'hydrogène [60]. Un manque potentiel




**« Dans le contexte du transport utilisant des PAC à hydrogène, les composants de l'infrastructure de ravitaillement et de celle à bord du véhicule sont tenus d'avoir une compatibilité démontrée ou documentée avec l'hydrogène, comme indiqué dans la norme ANSI/ CSA CHMC 1. »**

de disponibilité de normes relatives aux essais des matériaux des batteries ou d'outils comparatifs a été relevé pour les batteries [61].

Bien que le présent rapport ne s'appuie pas sur les conclusions de travaux antérieurs, les résultats ont été examinés conjointement avec les conclusions de la recherche et de l'analyse effectuées pour le présent rapport, décrites à la section 4.2.

## 4.2 Examen du contexte actuel de normes et de codes

Les normes et codes identifiés dans le cadre de cette recherche sont présentés dans les tableaux de l'annexe B. Les documents sont regroupés par éditeur et classés dans l'une des catégories suivantes :

- normes et codes globaux;
- normes et codes spécifiques à l'infrastructure ; et
- normes et codes spécifiques aux véhicules.

Il existe des secteurs où plusieurs normes s'appliquent et d'autres où les normes et codes applicables sont peu nombreux, voire inexistants. Le présent rapport évalue les deux scénarios, car les secteurs où plusieurs normes s'appliquent pourraient signifier qu'un secteur est bien couvert, mais elles pourraient aussi donner lieu à des normes contradictoires qui nécessiteraient une harmonisation et un alignement en ce qui concerne les applications ferroviaires. Les secteurs couverts par un petit nombre de normes ou de codes ou par une seule norme ou un seul code sont également évalués pour déterminer s'ils pourraient constituer une lacune dans le contexte actuel de normes et de codes.

### 4.2.1 Normes et codes globaux

Les normes et codes globaux s'appliquent à la fois aux véhicules et à l'infrastructure du réseau ferroviaire, ou aux processus utilisés pour développer le réseau (p. ex., les processus de gestion des dangers et des risques). Le contexte des normes et codes globaux est résumé selon les thèmes suivants :

- méthodes d'analyse des défaillances ;
- gestion de la sécurité opérationnelle ;
- sécurité fonctionnelle ;
- spécification et qualité de l'hydrogène comme combustible ;
- compatibilité des matériaux ; et
- préparation aux situations d'urgence et intervention.

#### 4.2.1.1 Méthodes d'analyse des défaillances

L'analyse des défaillances est une discipline exhaustive et systématique visant à identifier les défaillances potentielles des systèmes, à comprendre leurs origines, à déterminer l'ampleur des effets d'une défaillance et à définir des stratégies d'atténuation viables. Elle fait partie intégrante du processus d'ingénierie et de développement technologique et constitue une première étape cruciale lors de l'introduction d'une nouvelle technologie ou de l'extension d'un système existant à une nouvelle utilisation.

Étant donné que la technologie ferroviaire de l'hydrogène n'en est qu'à ses débuts, une analyse complète et rigoureuse des défaillances risque de jouer un rôle essentiel dans l'identification et la prévention des problèmes potentiels, l'atténuation efficace des risques et l'aide à l'intégration harmonieuse de la technologie.

Ce processus de précaution est essentiel pour faciliter le déploiement réussi et l'efficacité globale de la technologie ferroviaire de l'hydrogène. L'application d'une procédure robuste d'analyse des défaillances est susceptible d'améliorer la fiabilité, la sécurité et le développement durable de la nouvelle application technologique.

Les organismes de normalisation ont élaboré des lignes directrices complètes pour diverses méthodes d'analyse des défaillances, notamment les études de danger et d'exploitabilité (IEC 61882), l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (SAE J1739, IEC 60812) et l'analyse de l'arbre de défaillances (IEC 61025). Ces lignes directrices fournissent les cadres permettant d'assurer des analyses de défaillance cohérentes et rigoureuses dans toutes les facettes du développement et du déploiement de la technologie. Le Groupe CSA a également adopté les lignes directrices de l'ISO (CSA ISO 31000), ce qui témoigne de la reconnaissance mondiale de l'importance de ce processus. De plus, la norme NFPA 551 met l'accent sur l'évaluation des risques d'incendie, ce qui ajoute un autre niveau de vérification à ce processus complexe. Il est possible d'appliquer ces normes existantes aux applications ferroviaires.

#### 4.2.1.2 Gestion de la sécurité opérationnelle

La gestion de la sécurité opérationnelle (GSO) fait partie intégrante de l'exploitation industrielle et met l'accent sur la protection de l'ensemble du personnel impliqué dans un processus donné. Elle nécessite un examen approfondi du processus du point de vue de la sécurité, en évaluant les risques à chaque étape et en mettant en œuvre des mesures rigoureuses pour atténuer ces risques.

La GSO implique la catégorisation du processus et l'évaluation de ses répercussions potentielles d'une manière détaillée et structurée. Cette catégorisation implique souvent l'identification d'éléments, d'actions, de substances ou de matériels dangereux au sein du processus, et l'évaluation des risques associés. L'évaluation tient également compte de la manière dont ces aspects pourraient affecter non seulement les opérateurs immédiats, mais aussi l'environnement au sens large et toutes les communautés environnantes.

L'avènement de la technologie ferroviaire de l'hydrogène entraîne une série de nouveaux processus et de défis potentiels, qui nécessitent une évaluation et une gestion minutieuses. L'un de ces processus est le ravitaillement en hydrogène gazeux comprimé, qui pourrait entraîner des complications telles que le gel des buses lorsque le gaz se pressurise à l'intérieur du réservoir embarqué. De plus, l'utilisation d'hydrogène cryogénique introduit un ensemble de considérations uniques en matière de sécurité, en raison des températures extrêmement basses impliquées dans son stockage et son transport.

Ces défis ont nécessité la création de normes spécialisées pour la manipulation et l'utilisation de l'hydrogène dans ces nouveaux contextes. L'une de ces normes, la CGA P-28 de la Compressed Gas Association (CGA), fournit des conseils spécifiquement adaptés aux problèmes de sécurité particuliers posés par l'hydrogène cryogénique.

De plus, pour gérer le nouveau processus de ravitaillement en hydrogène, des protocoles spécifiques ont été élaborés et intégrés dans des normes telles que SAE J2601. Cette norme se concentre sur les protocoles de ravitaillement, en abordant les problèmes potentiels et en identifiant des méthodes pour alimenter les véhicules en hydrogène de manière sécuritaire et efficace.

Au Canada, le processus d'installation des technologies d'hydrogène est principalement guidé par le Code canadien d'installation de l'hydrogène (CAN/BNQ 1784-000). Ce document de référence essentiel définit les meilleures pratiques et les exigences pour l'installation de l'infrastructure d'hydrogène. Les systèmes de gestion de la sécurité opérationnelle sont régis par la norme CSA Z767, qui définit les exigences applicables aux installations et aux lieux de travail où sont manipulées ou stockées des matières dangereuses présentant des risques d'énergie potentielle ou cinétique.

#### 4.2.1.3 Sécurité fonctionnelle

La technologie de propulsion ferroviaire à hydrogène (train à hydrogène) représente un domaine d'ingénierie qui englobe de nombreux sous-systèmes tels que le système d'approvisionnement en hydrogène, le système de piles à combustible, le système de stockage de l'énergie et les systèmes électriques à haute et basse tension. Le fonctionnement efficace et sûr de ces sous-systèmes nécessite des mécanismes de contrôle complexes conçus pour faciliter le fonctionnement optimal de chaque composant.

Par exemple, le système de piles à combustible nécessite de l'hydrogène gazeux à des niveaux de pression, de température et d'humidité spécifiques. Un système efficace est nécessaire pour interpréter les signaux de demande de puissance envoyés par le mécanicien de locomotive et les convertir en commandes de répartition de la puissance qui gèrent l'équilibre entre les piles à combustible et les systèmes de batteries. Cette fonctionnalité repose souvent sur des systèmes électroniques programmables liés à la sécurité, tels que ceux décrits dans la norme UL 1998. Ces systèmes ont pour fonction de maintenir des conditions opérationnelles sûres, comme le prévoient des lignes directrices telles que la série de normes IEC 61508 (parties 1 à 7).

De plus, ces systèmes électroniques ont souvent une portée opérationnelle plus large, puisqu'ils contrôlent les machines conformément à des normes telles que IEC 62061. Ces normes couvrent la gestion du flux de carburant et, dans les situations les plus critiques, le fonctionnement des systèmes de ventilation pour évacuer les fuites d'hydrogène, une opération facilitée par les détecteurs de fuites, comme le stipule la norme UL 2075.

D'autres mesures de sécurité comprennent des détecteurs de court-circuit, des systèmes de sécurité incendie et des systèmes de distribution d'hydrogène, qui adhèrent à des directives telles que la norme UL 2249. Ces mesures de sécurité contribuent à créer un environnement opérationnel rigoureux et sûr pour les chemins de fer à hydrogène.

Si l'on considère le véhicule dans son ensemble, des normes supplémentaires telles que la norme ISO 23273-1 fournissent un cadre complet pour la sécurité et le fonctionnement des véhicules à hydrogène. Ces normes soulignent la complexité de la technologie de train à hydrogène, reflétant la nature multidimensionnelle de ses composants opérationnels et la nécessité d'avoir en place des mesures de contrôle et de sécurité rigoureuses.

#### 4.2.1.4 Spécification et qualité de l'hydrogène comme combustible

Comme mentionné dans la section 3.1.2, la qualité de l'hydrogène est essentielle à la performance et à la durée de vie des PAC à hydrogène, en particulier des PEMFC [45, 62]. De nombreuses normes précisent la qualité de l'hydrogène devant être utilisé comme combustible pour les PAC à hydrogène dans des environnements fixes et mobiles (p. ex., ISO 14687, SAE J2719), ainsi que la méthodologie d'échantillonnage et de sélection des combustibles à base d'hydrogène (p. ex., ASTM D 7606, SAE J3219) et le contrôle de la qualité du combustible dans un environnement de station de ravitaillement (ISO 19880-8). Bien qu'aucune de ces normes ne soit spécifique aux applications des véhicules ferroviaires, elles restent applicables.

#### 4.2.1.5 Compatibilité des matériaux

L'hydrogène, qui est la plus petite molécule, interagit de manière unique avec différents matériaux. Il modifie souvent leurs propriétés mécaniques, ce qui nécessite une sélection et un examen minutieux des matériaux qui seront en contact fréquent avec l'hydrogène. Les matériaux utilisés pour les composants intervenant dans le stockage, le transport, l'approvisionnement et l'utilisation de l'hydrogène devraient être choisis avec une extrême prudence, en évaluant s'ils peuvent résister en toute sécurité aux températures, aux pressions et à la dégradation potentielle des matériaux (comme les risques de fragilisation) associés à l'hydrogène.

Dans le contexte du transport utilisant des PAC à hydrogène, les composants de l'infrastructure de ravitaillement et de celle à bord du véhicule sont tenus d'avoir une compatibilité démontrée ou documentée avec l'hydrogène, comme indiqué dans la norme ANSI/CSA CHMC 1. Ces composants relèvent principalement des sous-systèmes d'approvisionnement et de

stockage de carburant, y compris, mais sans s'y limiter, les compresseurs et les pompes, les valves, les raccords, les réservoirs de stockage d'hydrogène, les manomètres, la tuyauterie de carburant, les systèmes de piles à combustible, les systèmes de moteurs à combustion interne à hydrogène, les systèmes de tuyauterie et les vaporisateurs.

Pour aider à résoudre les problèmes de compatibilité des matériaux avec l'hydrogène gazeux comprimé, le Groupe CSA a publié des normes pertinentes, telles que ANSI/CSA CHMC 1 et CSA/ANSI CHMC 2. D'autres organismes internationaux de normalisation, notamment ISO, JIS et ASTM, ont également publié des lignes directrices concernant ce domaine crucial.

Les normes ISO, notamment ISO TR-15916, ISO 21010, ISO 11114-2, ISO 11114-1, ISO 11114-3 et ISO 11439, abordent ce sujet en se concentrant sur la normalisation des méthodes d'essai pour la détection de la fragilisation, la documentation des taux de réaction et l'évaluation de la compatibilité globale des matériaux.

De même, les normes JIS telles que JSA JIS H 7201, JSA JIS H 7203 et JSA JIS H 7202 offrent des lignes directrices visant spécifiquement la mesure de diverses propriétés des alliages qui absorbent l'hydrogène, tout comme les normes ASTM, qui comprennent ASTM F1459, ASTM F519, ASTM G142, ASTM F1624, ASTM E2652 et ASTM B577.

La mise en œuvre complète de ces normes contribue à la sécurité, à l'efficacité et à la longévité des systèmes de transport utilisant des piles à combustible à hydrogène, en fournissant une feuille de route pour procéder à la sélection et aux essais des matériaux qui interagiront avec l'hydrogène dans divers contextes.

#### 4.2.1.6 Préparation aux situations d'urgence et intervention

La formation des premiers répondants en ce qui concerne la préparation aux situations d'urgence et à l'intervention qui en découle est essentielle pour la santé et le bien-être du personnel d'intervention d'urgence et des communautés dans lesquelles les incidents se produisent. Dans des situations telles qu'un déraillement, des intervenants non formés pourraient par inadvertance aggraver la situation, entraînant une émission involontaire d'hydrogène ou des circonstances susceptibles de déclencher une détonation. Il est donc important de préparer les individus à de telles situations.

La norme SAE J2990 est un document pertinent qui fournit des conseils et des procédures normalisées aux premiers et deuxièmes répondants en cas d'incidents impliquant des véhicules électriques (VE) alimentés par des batteries aux ions lithium. Il couvre également les risques découlant d'événements secondaires tels que les incendies externes ou les inondations. Il suggère la mise en œuvre de normes de conception et d'outils pour le secteur, le cas échéant. Puisqu'elles impliquent d'autres compositions chimiques pour les batteries et d'autres systèmes de propulsion, y compris les véhicules munis de piles à combustible à hydrogène, les interventions d'urgence en cas d'incidents sont traitées dans la norme SAE J2990/1. Outre les normes automobiles susmentionnées, la norme CSA Z246.2 traite de la préparation et de l'intervention en cas d'urgence dans les environnements du secteur impliquant du pétrole et du gaz naturel ; la signalisation commune pour les interventions d'urgence en cas d'incidents dans les transports impliquant des marchandises et des matières dangereuses est décrite dans le guide Emergency Response Guidebook (ERG) publié par le Department of Transportation des États-Unis [63].

### 4.2.2 Normes et codes spécifiques à l'infrastructure

#### 4.2.2.1 Installations d'entretien

Les installations d'entretien font partie intégrante de l'entretien des véhicules ferroviaires et représentent un aspect moins bien compris de la mise en œuvre de la technologie de propulsion ZE. Les installations existantes peuvent ne pas être équipées pour gérer les propriétés uniques et les risques associés à l'hydrogène ou aux batteries, notamment des systèmes de ventilation adéquats, des outils qui ne produisent pas d'étincelles, des systèmes de contrôle climatique

et d'autres mesures de sécurité utilisées dans des environnements où de l'hydrogène gazeux pourrait être émis ou dans lesquels des batteries sont stockées. Les différences concernant les exigences relatives aux installations spécifiques à chaque technologie soulignent la nécessité de mettre en place des mesures de sécurité rigoureuses et de modifier les pratiques d'exploitation pour chaque technologie.

Il est essentiel que ces installations soient équipées pour faire face à toute émission involontaire d'hydrogène et qu'elles prennent en compte les niveaux de sécurité des différents équipements et outils d'entretien. La nature de la technologie du train à hydrogène peut nécessiter une réévaluation des activités régulières d'entretien des chemins de fer. Par exemple, les tâches susceptibles de générer une source d'inflammation, telles que les étincelles résultant du reprofilage des roues et du rembobinage des moteurs de traction, pourraient devoir être effectuées dans une installation séparée de celle où s'effectuent les tâches impliquant l'équipement de force motrice afin d'atténuer le risque d'incidents liés à l'hydrogène.

Les normes existantes applicables aux installations d'entretien des trains à hydrogène sont limitées. Les normes CSA B401.1 et CSA B401.2, bien qu'elles traitent principalement des installations d'entretien des véhicules au gaz naturel et au propane respectivement, peuvent fournir quelques indications et sont référencées dans le Code canadien d'installation de l'hydrogène (CAN/BNQ 1784-000). De plus, les normes CSA C22.1 et NFPA 497 peuvent s'appliquer à ces installations, notamment en ce qui concerne la classification des emplacements dangereux.

En outre, la norme NFPA 80A fournit une ligne directrice générale qui devrait être prise en compte lors de l'implantation d'une installation d'entretien à proximité de sources potentielles d'inflammation. Le chapitre 18 de la norme NFPA 2 traite spécifiquement des installations d'entretien des véhicules à hydrogène, bien qu'elle vise l'échelle de l'automobile, qui transporte moins d'hydrogène en ordre de grandeur par rapport aux systèmes ferroviaires. Cette norme propose des mesures préventives contre les risques d'incendie et devrait être intégrée dans les protocoles de sécurité des installations d'entretien des véhicules à hydrogène.

#### 4.2.2.2 Stations de ravitaillement

Le matériel de ravitaillement est un élément essentiel de l'infrastructure de soutien des véhicules ZE. Le processus de ravitaillement en hydrogène diffère considérablement de celui du ravitaillement en combustibles fossiles liquides, tels que le diesel, dont l'utilisation constitue la pratique courante dans le secteur ferroviaire. Étant donné que l'hydrogène est généralement ravitaillé sous forme de gaz comprimé, et souvent réfrigéré, une connexion sécurisée et étanche de même que des contrôles de sécurité supplémentaires entre la station de ravitaillement et le véhicule s'avèrent nécessaires.

Compte tenu de la nature gazeuse et des propriétés uniques de l'hydrogène, il existe des lignes directrices précises pour la connexion de ravitaillement entre la station et le véhicule (p. ex., SAE J2600), pour d'autres parties de la station elle-même (p. ex., SAE J2799, ISO 19880-3 et ISO 19880-5), et pour les protocoles de ravitaillement (p. ex., SAE J2601). La communication entre la station et le véhicule est essentielle pour détecter les fuites potentielles pendant le ravitaillement et pour garantir un processus de remplissage sécuritaire tout en évitant les surpressions.

Il est important de noter que si les normes existantes visent principalement les véhicules routiers, elles ont été appliquées avec succès aux locomotives de manœuvre et aux véhicules ferroviaires régionaux. Toutefois, les taux de remplissage de ces normes ne sont probablement pas assez rapides pour les véhicules ferroviaires, dont le taux de remplissage nécessaire peut être de l'ordre de 15 à 20 kg/min pour les petits réservoirs (p. ex., dans les locomotives de manœuvre ou les trains régionaux). Les véhicules longue distance dotés de grands réservoirs nécessiteront probablement des taux de remplissage encore plus élevés pour faire le plein en un temps raisonnable, à l'instar des véhicules diesel. Pour atteindre des taux plus élevés, il pourrait s'avérer nécessaire de modifier les normes de ravitaillement actuelles ou d'introduire de nouvelles normes pour le matériel capable d'atteindre des taux de ravitaillement plus élevés.

De plus, certains composants de la station de ravitaillement doivent être certifiés pour l'utilisation de l'hydrogène. Ces composants incluent notamment des compresseurs et des pompes, du matériel de

distribution de carburant tel que les dispositifs de connexion de ravitaillement (couverts par les normes SAE J2600, CSA/ANSI HGV 4.1, CSA/ANSI LNG 4.1, CSA/ANSI NGV 4.1 et ANSI/CAN/CSA/ISO 12617), des tuyaux pour les distributeurs (ISO 19880-5) et des valves.

Le Groupe CSA a consacré beaucoup d'efforts à l'élaboration de normes et de codes relatifs aux stations de ravitaillement en hydrogène. Ces travaux sont principalement couverts par la norme plus générale CSA/ANSI HGV 4.9 et s'étendent aux composants spécifiques du poste de ravitaillement tels que les valves (CSA/ANSI HGV 4.4). Pour le ravitaillement en hydrogène liquide, la norme ISO 13984 fournit les lignes directrices nécessaires.

#### 4.2.2.3 Recharge des batteries

Les VHE étant de plus en plus répandus, diverses normes ont été publiées pour les systèmes de recharge des VE (p. ex., IEC 61851, UL 2734, série IEC 61980) et pour les nombreuses formes et types de fiches et de prises utilisées dans les systèmes de recharge des VE (p. ex., SAE J1772, IEC 62196-1). Bien que ces normes soient conçues pour les systèmes de VE automobiles, qui ne sont généralement pas assez puissants pour les applications ferroviaires, la norme SAE J3271 est en cours d'élaboration et porte sur les systèmes de recharge misant sur un courant continu en mégawatt, qui pourraient être suffisamment puissants pour les applications ferroviaires.

#### 4.2.2.4 Performance du matériel

Plusieurs normes mettent l'accent sur la performance attendue du matériel afin de garantir un fonctionnement sécuritaire et fiable. Ces lignes directrices définissent généralement des exigences spécifiques auxquelles les fabricants et les installateurs de pièces sont tenus de se conformer. Bien que ces normes soient axées sur la performance, la sécurité constitue également une considération essentielle. De plus, elles visent à normaliser les pièces tout au long de la chaîne d'approvisionnement et à maintenir la cohérence en ce qui concerne la performance et la sécurité dans diverses applications.

Par exemple, le Code canadien d'installation de l'hydrogène fait référence à de nombreuses normes basées sur la performance, telles que la norme CSA/ANSI HGV 4.3. Cette norme précise les méthodes de validation des performances des stations de ravitaillement en hydrogène et de leurs équipements associés.

La norme CGA H-5 de la Compressed Gas Association décrit les performances requises des systèmes d'approvisionnement en hydrogène en vrac, y compris les composants associés tels que les valves, les compresseurs et les pompes, les réservoirs de stockage d'hydrogène et les systèmes de tuyauterie.

De plus, les performances des compresseurs et des pompes sont traitées dans des normes internationales, notamment ISO 24490, ISO 13631, ISO 10439 (les quatre parties), ISO 10440-1, ISO 10440-2, ISO 10442 et ISO 13707.

Les exigences de performance des systèmes de distribution de l'hydrogène, en particulier les dispositifs de connexion de ravitaillement, sont traitées dans des normes telles que SAE J2600, CSA/ANSI HGV 4.1, CSA/ANSI LNG 4.1 et CSA/ANSI NGV 4.1. Néanmoins, les progrès de la technologie de ravitaillement en hydrogène, qui permettent des taux de remplissage plus rapides, pourraient nécessiter des modifications aux normes et codes actuels.

Enfin, la performance du matériel de production d'hydrogène, souvent déployé dans les installations de production d'hydrogène, sont définies dans les normes CSA/ANSI B22734 et UL 2264 pour les systèmes d'électrolyse, et par les normes ISO 16110-1, ISO 16110-2 et CSA/ANSI FC 5 pour la production à partir de reformeurs.

Essentiellement, ces normes de validation de la performance servent à garantir la sécurité et la fiabilité du matériel de production d'hydrogène dans les différentes parties de l'infrastructure d'hydrogène : de la production aux applications d'utilisation finale.

### 4.2.3 Normes et codes spécifiques aux véhicules

#### 4.2.3.1 Sécurité électrique

Les véhicules ferroviaires à hydrogène et à batterie fonctionnent fondamentalement comme des véhicules électriques, puisque l'énergie est transférée de la source d'énergie aux roues par l'intermédiaire de l'électricité. L'ampleur de cette puissance électrique varie en fonction de la taille du véhicule, allant de quelques centaines de kilowatts à des systèmes de plusieurs mégawatts. Cela nécessite une évaluation de la sécurité électrique, étant donné qu'une mauvaise manipulation de l'énergie électrique pourrait présenter des risques de décharge électrique, d'électrocution et d'incendie causés par des courts-circuits. Ces risques pourraient se présenter lorsque le véhicule est en marche, lorsqu'il est stationné et à la suite d'une collision – un scénario qui requiert une attention particulière en raison du risque accru de contact électrique involontaire lorsque le matériel est endommagé. De plus, il faut tenir compte des multiples sources d'énergie électrique qui existent dans le véhicule, notamment les batteries, les piles à combustible et les moteurs de traction électrique utilisés pour le freinage par récupération.

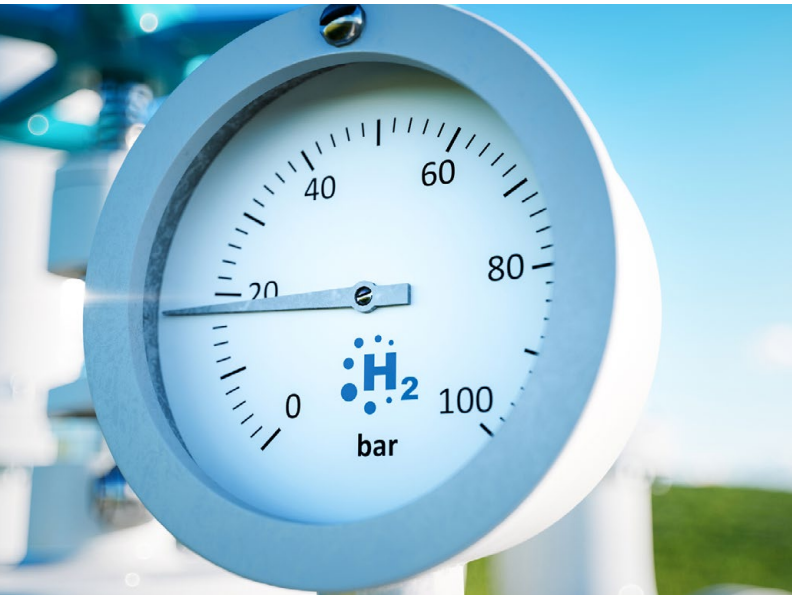
Les principaux documents régissant la sécurité électrique sont le Code canadien de l'électricité (CSA C22.1) et le National Electrical Code (NFPA 70). En ce qui concerne spécifiquement les véhicules électriques, des normes comme ISO 6469-3 et SAE J2344 fournissent un guide pour le véhicule dans son ensemble, avec des normes particulières (UL 458) qui traitent des dispositifs de conversion électronique de puissance. Pour ce qui est de la sécurité des batteries, les normes IEC 62660-3 et IEC 62485-3 traitent de la sécurité de l'installation, de l'utilisation, de l'inspection et de l'entretien de ce matériel. En ce qui concerne l'exploitation ferroviaire, les normes IEC 63341-1 et IEC 63341-2 traitent de la sécurité électrique des systèmes d'alimentation des piles à combustible à hydrogène et des systèmes de stockage du combustible. Les normes IEC 62282-4-101 et IEC 62282-5-100 définissent les exigences en matière de sécurité des systèmes de piles à hydrogène dans les cas d'une utilisation de transport industriel et d'alimentation mobile en général.

En effet, les systèmes haute tension et basse tension d'un véhicule ferroviaire ZE ont leurs propres implications et complexités en matière de sécurité, et devraient tous deux être manipulés avec précaution. Les systèmes à haute tension pourraient présenter des risques immédiats pour la vie en raison de la grande quantité d'énergie impliquée, tandis que les systèmes à basse tension, bien qu'ils puissent sembler moins dangereux, sont également cruciaux pour assurer le fonctionnement sécuritaire du véhicule, car ils contrôlent des composants essentiels.

Les systèmes à haute tension des véhicules ferroviaires ZE sont responsables de l'entraînement principal et de la propulsion. Ces systèmes fonctionnent à des tensions susceptibles de présenter un risque d'électrocution directe. La sécurité de leur fonctionnement, de leur entretien et de leur inspection fait donc l'objet de normes de sécurité telles que CSA C22.1, NFPA 70, ISO 6469-3, SAE J2344 et UL 458. Les barrières de sécurité, l'isolation, la mise à la terre et les verrouillages de sécurité sont souvent utilisés pour minimiser le risque de contact accidentel avec des pièces à haute tension.

D'un autre côté, les systèmes à basse tension contrôlent généralement des fonctions auxiliaires telles que l'éclairage, les klaxons, les essuie-glaces, la commande des valves d'hydrogène et les systèmes de gestion de la batterie. Même si les tensions sont plus faibles, les défaillances de ces systèmes risquent tout de même de provoquer des incendies, d'endommager le matériel, de poser des problèmes de fonctionnement et de blesser le personnel. La sécurité des systèmes à basse tension est donc tout aussi importante. Des normes telles que IEEE 16 traitent des exigences de sécurité pour les circuits auxiliaires à basse tension dans les applications ferroviaires.

En résumé, lors de la mise en œuvre et de l'exploitation de véhicules ferroviaires alimentés par des batteries ou par de l'hydrogène, il est essentiel d'aborder les aspects de sécurité des systèmes haute tension et basse tension de manière exhaustive, et de respecter les exigences applicables. L'objectif vise à s'assurer que tous les systèmes électriques, quel que soit leur niveau de tension, sont conçus, installés et entretenus de manière à fournir un service sécuritaire et fiable.




**« Il ne faut pas sous-estimer les implications des systèmes sous pression en matière de sécurité. »**

### 4.2.3.2 Sécurité des systèmes sous pression

Les systèmes sous pression sont utilisés dans une grande variété d'applications, allant des processus industriels aux transports. À la base, ces systèmes utilisent la pression pour remplir des fonctions spécifiques ; le fluide pressurisé est soit un gaz, soit un liquide, soit même une boue. Dans les véhicules ferroviaires, les systèmes sous pression font partie intégrante du fonctionnement du véhicule. Par exemple, le système de freinage des trains utilise souvent de l'air sous pression. De plus, les véhicules ferroviaires à pile à combustible à hydrogène existants utilisent de l'hydrogène comprimé comme carburant, ce dernier conservant une pression supérieure à la pression atmosphérique jusqu'à ce qu'il atteigne l'entrée de la pile à combustible.

Il ne faut pas sous-estimer les implications des systèmes sous pression en matière de sécurité. Une dépressurisation soudaine causée par des structures compromises, telles que des tuyaux ou des valves, risque de déclencher une libération rapide d'énergie susceptible de faire voler des pièces en éclats et de présenter un risque pour les personnes et pour le matériel [64].

La sécurité des systèmes sous pression est un sujet d'une importance considérable qui couvre la conception, la construction, l'inspection, les essais, l'entretien et l'exploitation. Le Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC) de l'ASME, auquel renvoie la norme CSA B51, énonce les exigences relatives à la durée de vie des appareils sous pression en fonction des cycles de mise sous pression et des essais effectués pour déterminer la durée de vie. De plus, la norme CAN/BNQ 1784-000 couvre divers aspects liés à l'hydrogène, y compris les exigences relatives à la protection contre la surpression des installations d'hydrogène.

Les limiteurs de pression sont essentiels à la sécurité, car ils servent de protection contre la surpression. Dans les véhicules à hydrogène comprimé, il pourrait s'agir de limiteurs de pression thermiques activés par la chaleur, généralement placés sur le dessus du réservoir d'hydrogène. Les normes CSA, ISO et CGA couvrent entièrement ces valves, qu'il est possible de trouver, par exemple, sur les cylindres de stockage, les tubes et la tuyauterie de carburant. La norme CSA/ANSI PRD 1 couvre les limiteurs de pression pour les réservoirs de carburant des véhicules alimentés au gaz naturel, tandis que les normes CSA/ANSI HPRD 1 et ISO 19882 sont spécifiques aux limiteurs de pression thermiques activés par la chaleur pour les réservoirs de carburant des véhicules alimentés à l'hydrogène comprimé. De plus, les normes ISO 4126-1 et ISO 4126-5 s'appliquent aux valves d'un diamètre égal ou supérieur à 4 mm et d'une pression égale ou supérieure à 0,1 bar. La CGA propose des lignes directrices pour la sélection et le dimensionnement des limiteurs de pression (CGA S-1.1), des conteneurs portables (CGA S-1.2) et des conteneurs fixes (CGA S-1.3). Ces lignes directrices

devraient être considérées, au même titre que la CGA PS-28, qui présente un énoncé de position sur les limiteurs de pressions activés par la chaleur qui ne sont pas conforme à la section VIII du BPVC de l'ASME, et que la CGA PS-43, qui fournit des conseils sur la sélection des limiteurs de pression spécifiquement pour les tubes.

Dans le contexte des régulateurs de pression, des limiteurs de pression, des capteurs et des manomètres pour véhicules, la norme CSA HPIT 1 propose des lignes directrices pour les camions industriels alimentés à l'hydrogène comprimé. Elle décrit les exigences minimales relatives aux matériaux, à la conception, à la fabrication et aux essais des composants faisant partie intégrante d'un système de stockage et de manutention de l'hydrogène, y compris divers types de valves, de raccords, de réservoirs de stockage et de tuyauterie de carburant.

Comme indiqué, le stockage de l'hydrogène liquide dans les véhicules ferroviaires pourrait améliorer la densité d'énergie du carburant, ce qui permettrait d'augmenter l'autonomie des véhicules. Bien qu'il n'existe pas de normes spécifiques pour les dispositifs de décompression des réservoirs portables d'hydrogène liquide, il est possible de s'inspirer des normes suivantes comme base de normalisation pour les composants des systèmes de ravitaillement des véhicules routiers alimentés au gaz naturel liquéfié (GNL) : CSA/ANSI LNG 3.3, CSA/ANSI LNG 3.4, CSA/ANSI LNG 3.7, CSA/ANSI LNG 3.8, CSA/ANSI LNG 3.13 et CSA/ANSI LNG 3.19.

#### 4.2.3.3 Sécurité incendie

Comme indiqué précédemment, les batteries, en particulier celles qui sont soumises à des contraintes électriques, mécaniques ou thermiques, représentent un risque important d'inflammation et d'incendie dans les véhicules électriques.

Le système électrique, qui comprend des éléments tels que le câblage, les convertisseurs et les systèmes de stockage d'énergie, constitue un autre domaine crucial. La norme UL 2734, par exemple, fournit des lignes directrices pour les composants tels que les prises de service des VE, les connecteurs d'un système de charge embarqué pour VE et les composants haute tension.

Pour une compréhension globale de la sécurité des véhicules électriques, la norme SAE J2344 fournit des recommandations pour la conception des véhicules de moins de 10 000 livres destinés à une utilisation sur les voies publiques. Cependant, pour les détails spécifiques aux véhicules à pile à combustible, la pratique recommandée par les normes SAE J2578, ISO 23273-2 et UL 2267 offrent des lignes directrices techniques concernant l'intégration sécuritaire des systèmes de piles à combustible et la gestion des systèmes de stockage et de manipulation de l'hydrogène.

Les normes IEC 62660-3 et IEC 62485-3 définissent les exigences de sécurité pour les batteries utilisées dans les applications de traction. Elles établissent des procédures d'essais pour les piles et les blocs-batteries destinés à être utilisés dans la propulsion des véhicules électriques. La norme IEC 62485-3 s'applique aux locomotives alimentées avec une batterie.

Il existe une multitude de normes qui traitent en détail de la sécurité des systèmes de stockage d'énergie à base de batteries aux ions lithium, notamment les normes IEC 62660-3, IEC 62485-3, SAE J2380, SAE J2929, UL 583, SAE J2464, UL 62133-2, SAE J2344, UL 62133-1, UL 2271, AS 7486, UL 2580, UL 62133 et ISO 6469-1.

Une autre source d'inflammation potentielle dans un véhicule à pile à hydrogène est le système d'alimentation en hydrogène. La norme CSA/ANSI HGV 3.1 traite des aspects de sécurité des composants du système d'alimentation en carburant, notamment les valves, les injecteurs de gaz, les manomètres, la tuyauterie de carburant et les limiteurs de pression. Bien qu'elle ne soit pas spécifique aux véhicules à hydrogène, la norme CSA B109.1, qui concerne le code d'installation des véhicules alimentés au gaz naturel comprimé (GNC), peut fournir des concepts applicables compte tenu de la nature du gaz comprimé.

La norme ISO 13985 traite spécifiquement de l'hydrogène liquide dans les réservoirs à bord des véhicules terrestres, ce qui pourrait s'appliquer aux réservoirs d'hydrogène liquide utilisés pour la propulsion ferroviaire. Elle définit les exigences de fabrication et les méthodes d'essais pour ces réservoirs. De plus, la norme CSA B109.2, qui traite de l'installation des véhicules alimentés au GNL, pourrait

offrir des concepts applicables aux véhicules alimentés à l'hydrogène liquide. En ce qui concerne la livraison d'hydrogène en vrac, par exemple à une installation de ravitaillement, la norme CGA P-88 fournit des lignes directrices pour les remorques porte-tubes et les livraisons de liquides.

La norme SAE J2990 propose des pratiques pour les premiers répondants en cas d'incendie de VE, bien qu'il s'avère essentiel de noter que les normes et codes relatifs aux incendies de VE ne sont pas très nombreux. La norme SAE J2990 mérite un examen plus approfondi quant à son applicabilité aux véhicules ferroviaires, en particulier aux locomotives électriques à batterie, qui contiennent parfois plusieurs mégawattheures d'énergie stockée.

Enfin, la norme SAE J1766 propose une pratique recommandée pour les essais de choc des véhicules électriques à pile à combustible et à batterie. Cette norme pourrait être envisagée dans le cadre d'une éventuelle adaptation aux applications ferroviaires.

#### 4.2.3.4 Prévention et contrôle des explosions

Des mesures de prévention et d'atténuation sont nécessaires tant pour la sécurité incendie, qui gère le risque d'inflammation, que pour la prévention et le contrôle des explosions, qui s'attardent à la menace distincte des explosions.

L'inflammation est un processus chimique qui commence lorsqu'une substance accumule suffisamment d'énergie pour déclencher la réaction, en émettant de la chaleur et de la lumière au cours du processus. À l'inverse, une explosion est un changement de pression brusque et violent, généralement causé par l'expansion rapide de gaz, qui se traduit souvent par une onde de choc [65].

Certains éléments sont nécessaires pour qu'une explosion se produise, notamment une source de combustible comme l'hydrogène ou l'oxygène, et une source d'allumage comme une étincelle électrique ou un incendie. La prévention des explosions consiste à réguler ou à supprimer un ou plusieurs de ces éléments. Une stratégie d'atténuation courante peut consister à s'assurer que la concentration de combustible dans l'air reste inférieure à sa limite d'explosivité. Toutefois, cela risque de s'avérer difficile en fonction de la zone d'inflammabilité du combustible (p. ex., l'hydrogène a une zone d'inflammabilité étendue de 4 à 75 % de concentration dans l'air [32]).

Les normes telles que la NFPA 69, NFPA 55, NFPA 2, NFPA 52 et CAN/BNQ 1784-000 jouent un rôle dans la sécurité des opérations et la prévention des explosions. La sécurité incendie constitue une priorité, car les incendies sont susceptibles de provoquer des explosions, en particulier si un dégagement d'hydrogène coïncide avec des incendies de batteries ou de systèmes électriques, ou en résulte.

La série de normes IEC 60079 sur les atmosphères explosives traite de manière exhaustive de l'utilisation des systèmes électriques dans les atmosphères explosives. Certaines parties ont été adoptées par la CSA et l'UL avec des modifications (voir l'annexe B pour les amendements pertinents à la série IEC 60079 publiés dans la série de normes CSA C22.2 n° 60079). Ces normes visent à empêcher que les systèmes électriques favorisent l'apparition de conditions dangereuses qui provoquent des explosions s'ils sont situés dans une atmosphère explosive ; il est possible de les considérer en conjonction avec la norme NFPA 70. De plus, la norme UL 913 aborde le concept de câble Ethernet à deux fils à sécurité intrinsèque et traite des risques d'inflammation dans les lieux désignés comme dangereux. La norme UL 1642, qui couvre les piles primaires et secondaires, comprend des mesures visant à atténuer les risques d'incendie ou d'explosion.

La source de carburant constitue un autre élément crucial en lien avec les explosions. La probabilité de fuites d'hydrogène et le piégeage consécutif d'hydrogène gazeux à l'intérieur du véhicule risquent, dans certaines circonstances, de provoquer des explosions. Par conséquent, la détection de gaz inflammables à l'aide de détecteurs de gaz, telle que traitée dans les normes CSA C22.2 no 60079-29-1 et CSA C22.2 no 60079-29-4, est une autre mesure de sécurité qui contribue à la prévention des explosions. Dans toutes les situations, l'hydrogène doit être ventilé de manière sécuritaire, comme le prévoient les normes CGA G-5.5 et NFPA 91.

Le risque d'explosion ne se limite pas aux véhicules. L'infrastructure de ravitaillement, les installations d'entretien manipulant l'hydrogène de même que

l'interface entre le véhicule et la station de ravitaillement présentent également des risques d'explosion supplémentaires. Ces risques pourraient être dus à des fuites d'hydrogène piégé à l'intérieur d'un hangar d'entretien ou à une interface de ravitaillement défectueuse provoquant des fuites d'hydrogène qui pourraient s'enflammer. Le document CGA PS-48 contient une recommandation sur les distances de retrait pour le stockage d'hydrogène en vrac, en réponse aux exigences imprécises de la norme NFPA 55. La norme CGA P-88 fournit des lignes directrices sur l'entretien du matériel de livraison en vrac, y compris les remorques porte-tubes utilisées pour la livraison de gaz comprimé. La norme CGA PS-69 fournit des distances de séparation pour les systèmes d'approvisionnement en hydrogène liquéfié ; il est possible de l'examiner conjointement avec les normes CSA/ANSI LNG 3.5, CSA B51, NFPA 55, CSA/ANSI HGV 3.1, CSA B109.1 et CSA B109.2.

#### 4.2.3.5 Sécurité structurelle

La sécurité structurelle englobe la robustesse du châssis, de la carrosserie et des éléments internes d'un véhicule, ainsi que les risques éventuels liés à leur déformation ou à leur détérioration sous l'effet de chocs et d'oscillations. Les composants structurels peuvent être soumis à trois types principaux de charges dues aux chocs et aux vibrations :

- les charges de fatigue résultant d'une exploitation régulière, telles que les vibrations qui se produisent lorsque le véhicule traverse des joints de voie ;
- les charges de choc prévues dans le cadre d'une exploitation régulière, telles que les charges causées par des accélérations et des décélérations répétées, en particulier dans les trains longs soumis à des forces de traction et de compression, ou par l'attelage et le découplage du véhicule ; et
- les importantes forces d'impact entraînant des déformations, généralement causées par des collisions ou des déraillements.

Les normes ASME RT-1 et ASME RT-2 définissent des critères structurels pour les véhicules ferroviaires légers et lourds, respectivement. Elles se limitent aux véhicules destinés au transport de passagers et utilisent des systèmes de gestion de l'énergie en cas de collision. Bien qu'elles se concentrent sur la sécurité structurelle, elles ne concernent précisément aucun type de propulsion. Cependant, elles peuvent s'appliquer à la protection de l'équipement de propulsion à l'intérieur du véhicule (p. ex., les batteries installées dans la caisse de wagon, dont la structure assure la protection des batteries en cas d'impact).

Sur les chemins de fer réglementés par la FRA, les exigences minimales en matière de facteurs associés à la charge statique d'accélération sont décrites dans la partie 238 du titre 49 du CFR pour le transport ferroviaire de passagers. Ces exigences en matière de charge statique s'appliquent à tous les composants fixés à la caisse de wagon, y compris les composants et sous-systèmes du groupe motopropulseur tels que les batteries, les PAC à hydrogène et les réservoirs de carburant, ainsi que leurs systèmes de soutien. Ces exigences sont également conformes à la section 6.6.2 de la norme AAR S-580, citée en référence dans le *Règlement relatif à l'inspection et à la sécurité des locomotives de chemin de fer* de Transports Canada [66], qui précise les exigences en matière de résistance aux chocs pour les locomotives de transport de marchandises. Dans le contexte du matériel ferroviaire de transport de passagers, y compris les locomotives, les wagons-cabines, les unités multiples, le matériel tracté par locomotive et les wagons refouleurs ne transportant pas de passagers, la norme APTA PR-CS-S-034-99 spécifie les facteurs de charge statique d'accélération minimale pour le matériel embarqué et la structure de la caisse de wagon dans le matériel de transport de passagers.

Le réservoir de carburant est l'un des principaux éléments de la sécurité structurelle des véhicules conventionnels, en raison des risques liés à la grande quantité d'énergie qui y est stockée. Les règlements existants relatifs à l'intégrité structurelle et aux essais, tels que la partie 238 du titre 49 du CFR, se réfèrent spécifiquement aux normes industrielles élaborées par des OEN tels que l'APTA et l'AAR. En ce qui concerne le réservoir de carburant du véhicule, plusieurs normes et règlements, tels que APTA PR-CS-S-007-98 et la partie 229 du titre 49 du CFR, précisent les exigences minimales en matière de

solidité structurelle, d'incorporation du véhicule et de fabrication. La partie 238 du titre 49 du CFR spécifie également des exigences pour les réservoirs de carburant. Ces normes sont principalement conçues pour les réservoirs situés dans le train de roulement, car elles font référence aux charges inférieures et latérales, et font systématiquement allusion à l'espace libre entre le réservoir et les rails. Les composants des autres systèmes de propulsion, tels que les piles à combustible, les réservoirs ou les batteries, peuvent ne pas être situés dans le train roulant et être montés sur le toit ou à d'autres endroits de la carrosserie du véhicule. Par conséquent, plusieurs de ces normes de protection pourraient ne pas être directement applicables, mais il serait envisageable de les étendre aux autres systèmes de propulsion. De plus, les valeurs de charge des normes existantes sont adaptées à l'acier, spécifiant parfois des caractéristiques telles que l'épaisseur et la limite d'élasticité du matériau à utiliser. Ces exigences ne sont pas nécessairement applicables aux matériaux utilisés dans les batteries ou les réservoirs de stockage d'hydrogène comprimé, ces derniers étant souvent constitués d'un revêtement intérieur non métallique fait de matériaux composites entouré d'une enveloppe externe en fibre de carbone [67].

La norme SAE J1766 présente des pratiques recommandées pour tester l'intégrité, en cas de choc, des véhicules équipés de systèmes à haute tension, y compris les véhicules électriques, les véhicules à pile à combustible et les véhicules hybrides électriques. La norme CSA/ANSI HGV 3.1 définit les exigences relatives aux composants du système d'alimentation des véhicules fonctionnant à l'hydrogène gazeux comprimé.

En ce qui concerne les réservoirs de carburant, la norme AAR M-1004 spécifie les forces minimales que la structure de soutien du réservoir intérieur d'un réservoir de carburant à GNL est tenue de supporter sans céder lors d'un impact. Étant donné que le réservoir de GNL est généralement attelé à une locomotive, celle-ci est également tenue de supporter des charges similaires à celles décrites dans la norme IEC 61373, qui précise les exigences en matière d'essais de chocs et de vibrations pour le matériel roulant, bien qu'avec de légères variations par rapport aux spécifications énumérées dans la norme AAR M-1004. Au moment de la rédaction de ce document, des travaux étaient en cours pour étendre cette norme à d'autres technologies de propulsion [68].

#### 4.2.3.6 Étiquetage et marquage

L'étiquetage et le marquage sont des pratiques essentielles pour identifier et fournir des informations cruciales sur les produits, les composants ou les systèmes. Dans le contexte des VE et des véhicules électriques à pile à combustible (VEPC), les étiquettes apposées sur les batteries et les réservoirs d'hydrogène fournissent des détails essentiels concernant la manipulation, l'installation, l'entretien, les dangers et l'élimination, et pourraient fournir des informations vitales aux intervenants en cas d'urgence. Les identifiants, généralement présentés sous forme de symboles, de mots ou de codes, communiquent la nature du contenu, des instructions spécifiques pour assurer une manipulation sécuritaire et des avertissements concernant les dangers. Ainsi, un étiquetage et un marquage appropriés contribuent de manière significative à l'atténuation des risques et à la sensibilisation à ces derniers pour les VE et les VEPC.

Le respect des normes de sécurité et de performance est souvent indiqué par le biais de ces étiquettes (p. ex., à l'aide de marques, de timbres, de décalcomanies ou de plaques apposées sur l'article), ce qui facilite le contrôle de la qualité, le respect de la législation et le suivi des protocoles d'entretien [69]. L'ajout d'étiquettes et de plaques peut également résulter de l'intégration d'un composant dans un sous-système ou dans un véhicule dans son ensemble. De plus, les procédures d'élimination adéquates sont communiquées au moyen de ces marquages. Les étiquettes et les marquages pourraient également fournir aux intervenants en cas d'urgence des informations vitales qui s'appuient sur des symboles et des étiquettes d'identification des dangers communs, tels que ceux décrits dans le guide des interventions d'urgence élaboré conjointement par Transports Canada, le Department of Transportation des États-Unis et le Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes du Mexique, pour comprendre rapidement les risques et les interventions recommandées lorsqu'il s'agit de matières dangereuses [70].

Des codes tels que la partie 172 du titre 49 du CFR, qui traite des communications sur les matières dangereuses et des informations sur les interventions d'urgence, décrivent les exigences générales en matière d'étiquetage, y compris le contenu et l'emplacement des étiquettes, ainsi que les exigences relatives à des articles spécifiques, tels que les batteries au lithium et les gaz inflammables. Le *Règlement sur le transport des marchandises dangereuses* du Canada et la partie 173 du titre 49 du CFR décrivent les exigences en matière d'emballage et de marquage pour les batteries transportées [71]. Outre le CFR, la loi *Bipartisan Infrastructure Law* exige que l'EPA élabore des lignes directrices sur le recyclage et l'étiquetage des batteries d'ici 2026 [72].

Les exigences en matière de marquage et d'étiquetage sont également abordées dans le cadre de normes telles que la SAE J1798, qui fournit des recommandations sur les performances des batteries de VE, et la norme CSA/ANSI HGV 2, qui traite du marquage approprié des réservoirs de stockage d'hydrogène comprimé. Les normes existantes pourraient être élargies pour inclure des sous-systèmes relativement courants, tels que plusieurs piles, modules, chaînes et gestion thermique dans un système de stockage d'énergie, ou plusieurs cylindres d'hydrogène en lots avec les dispositifs de sécurité appropriés.

#### 4.2.3.7 Batteries et gestion de l'énergie

Les normes qui traitent collectivement de diverses mesures de sécurité, d'essai et de performance pour les véhicules électriques et les véhicules à pile à combustible ont été identifiées. La norme CSA SPE-343 définit les exigences relatives aux systèmes de gestion de l'énergie utilisés dans les véhicules électriques. Les normes IEC 62660-1 et IEC 63341-2 définissent les spécifications relatives aux essais et aux performances des piles aux ions lithium utilisées dans les véhicules électriques. La norme IEC 62864-1 les complète en spécifiant des procédures pour les essais de chocs mécaniques et de vibrations des blocs et modules de batteries au lithium-ion. Le Groupe CSA a récemment publié une spécification technique pour les batteries de traction aux ions lithium embarquées, la norme CSA TS-602, qui constitue une dérogation à la norme IEC 62928 pour l'Amérique du Nord. La norme SAE J2464 fournit des pratiques recommandées pour les essais abusifs des systèmes de stockage d'énergie rechargeable. Parallèlement, la norme SAE J2929 définit des normes de sécurité pour les systèmes de propulsion à batterie au lithium, et la norme ISO 12405-4 définit des procédures d'essai pour les batteries aux ions lithium et les systèmes destinés aux véhicules à propulsion électrique, contribuant ainsi à leur sécurité et à leur longévité.

#### 4.2.3.8 Stockage de l'hydrogène

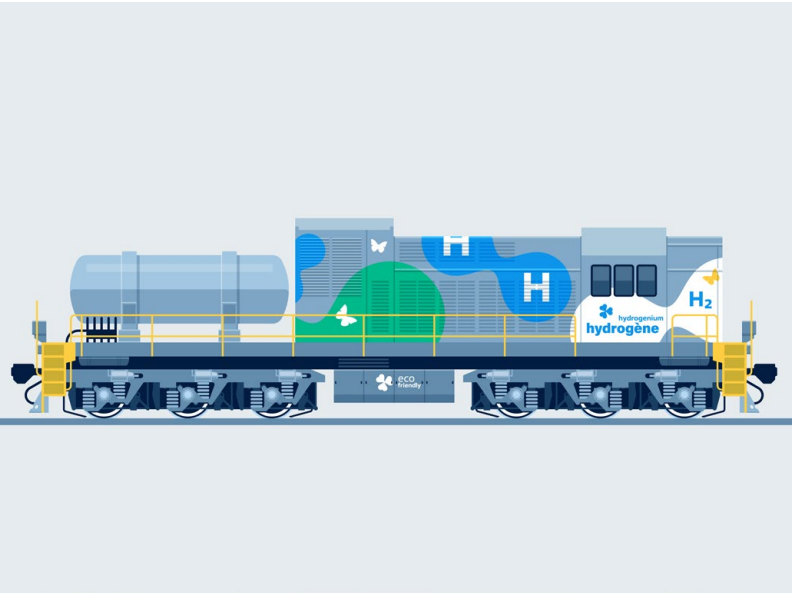
En ce qui concerne les véhicules à hydrogène, des normes comme ISO 16111 et CSA B51 définissent les exigences relatives aux dispositifs de stockage de gaz transportables pour l'hydrogène. La norme ISO 11439 les complète en détaillant les exigences de conception et de construction des cylindres à gaz composites pour le stockage de l'hydrogène. La norme ISO 19882 couvre les limiteurs de pression thermique activés par la chaleur pour les réservoirs de stockage d'hydrogène sous pression sur les véhicules, comme indiqué dans la section 4.2.3.2. Enfin, la norme SAE J2579 définit les exigences relatives aux systèmes d'alimentation en hydrogène, y compris les systèmes de stockage et de manutention.

# 5 Possibilités d'élaboration de normes et de codes

Les sections suivantes décrivent les lacunes identifiées dans la documentation existante et fournissent une feuille de route recommandée pour combler ces lacunes et faire progresser le développement et l'adoption des technologies de propulsion ZE dans le secteur ferroviaire.

## 5.1 Lacunes identifiées dans le contexte actuel

L'examen des normes et les consultations avec les parties intéressées ont permis d'identifier des lacunes dans les normes et codes existants applicables aux technologies d'hydrogène et de batterie dans le contexte ferroviaire nord-américain. Bien que les normes d'autres régions ou secteurs puissent être pertinentes pour un




**« Pour garantir l'adoption généralisée de la technologie ZE, il sera nécessaire de normaliser l'infrastructure, le matériel et les processus qui soutiennent l'échange de matériel roulant. »**

sujet identifié comme une lacune, il peut être nécessaire de s'écarter de la norme originale pour s'assurer de son applicabilité dans le secteur ferroviaire nord-américaine (p. ex., un sujet traité dans les normes ferroviaires européennes ou dans les normes automobiles nord-américaines).

Les lacunes identifiées ont été classées selon les mêmes catégories que les groupes de normes et de codes existants :

- normes et codes globaux ;
- normes et codes spécifiques à l'infrastructure ; et
- normes et codes spécifiques aux véhicules.

### 5.1.1 Normes et codes globaux

#### 5.1.1.1 Interopérabilité et exploitation

Le matériel roulant du secteur ferroviaire, tel que les véhicules à moteur et les wagons, est fréquemment échangé entre différents chemins de fer, créant ainsi un réseau ferroviaire nord-américain qui couvre le Canada, les États-Unis et le Mexique ; cet échange est facilité par les normes régies par l'AAR. Les chemins de fer gèrent et déplacent sur leur réseau une quantité importante de matériel roulant qui ne leur appartient pas (qui appartient souvent à d'autres chemins de fer, à des sociétés de location, à des opérateurs de covoiturage ou à des clients), ce qui nécessite des normes pour assurer un fonctionnement sécuritaire et efficace à travers le réseau ferroviaire nord-américain, et permettre l'échange de matériel roulant entre différentes sociétés ou propriétaires de réseau. Par exemple, les normes permettent de s'assurer que les essieux montés ont la bonne largeur pour circuler sur les chemins de fer, que les wagons individuels, y compris les raccords de freinage, peuvent être attelés les uns aux autres pour former des trains, et que plusieurs locomotives dans un groupe ou réparties dans un train peuvent être commandées à partir du véhicule moteur de tête. Pour garantir l'adoption généralisée de la technologie ZE, il sera nécessaire de normaliser l'infrastructure, le matériel et les processus qui soutiennent l'échange de matériel roulant. Cela s'appliquera, entre autres, à l'interface conducteur-véhicule, à la conception des installations et à l'outillage, aux processus requis pour assurer un fonctionnement sûr, au ravitaillement en carburant et à la recharge, à l'entretien et à la réparation. Ce problème est plus important pour les chemins de fer de transport de marchandises que pour les agences de transport de passagers, en raison de l'ampleur des échanges de matériel roulant. Les sections 4.2.2.2 et 4.2.2.3 fournissent des détails supplémentaires sur l'infrastructure de ravitaillement et de recharge. La section 5.1.3.10 traite de l'interface conducteur-véhicule.

De plus, les locomotives fonctionnent souvent dans un groupe de traction où plusieurs locomotives sont attelées les unes aux autres et en mode de puissance répartie, où une rame comprend plusieurs locomotives réparties dans le train (p. ex., trois locomotives à

l'avant, une au milieu et deux à l'arrière). En mode groupé et distribué, les signaux de la locomotive de tête contrôlent les signaux de demande de puissance pour toutes les autres locomotives. Afin d'assurer un fonctionnement harmonieux au sein des groupes de même technologie et des groupes à technologies mixtes, tout nouveau véhicule ferroviaire ZE devrait être compatible avec une interface de communication normalisée, souvent appelée unité multiple (UM) lorsque les locomotives fonctionnent en groupe, et avec la commande radio appropriée lorsqu'elles sont exploitées en mode distribué. Par conséquent, les normes existantes relatives aux interfaces de communication doivent être compatibles avec la force motrice ZE et, éventuellement, devront être modifiées pour tenir compte des signaux qui n'étaient pas inclus auparavant dans les normes de communication, par exemple l'état de charge de la batterie.

**Lacunes :**

- Des normes d'interface et d'interopérabilité pour les connexions mécaniques, électriques et de contrôle entre les véhicules à moteur et les sous-systèmes embarqués.
- Des processus permettant l'exploitation des véhicules à moteur ZE sur le réseau ferroviaire nord-américain.

#### 5.1.1.2 Intervention en cas d'urgence

Les risques associés aux technologies de propulsion ferroviaire ZE diffèrent de ceux associés aux véhicules ferroviaires à moteur diesel. Pour atténuer ces risques, les premiers et deuxièmes répondants lors d'incidents impliquant des véhicules ferroviaires ZE auront besoin d'une formation et de matériel adéquats afin de répondre aux risques et de les gérer de manière sécuritaire. Les parties intéressées ont discuté des diverses interventions qui peuvent s'avérer nécessaires lorsque des technologies différentes sont rencontrées au cours d'un incident. Par exemple, les incendies impliquant du diesel, de l'hydrogène ou des batteries peuvent tous nécessiter une intervention différente. Il existe des normes automobiles pour les intervenants d'urgence dans le cas des VE (p. ex., SAE J2990) et des véhicules à hydrogène (p. ex., SAE J2990/1) ; toutefois, il pourrait s'avérer nécessaire de créer de nouvelles normes spécifiquement pour les applications ferroviaires en raison de la quantité accrue de stockage d'énergie à bord et de la possibilité que le matériel spécifique au secteur ferroviaire diffère en ce qui concerne la composition chimique, l'état ou le mode de stockage, ou encore qu'il soit doté de mécanismes de sécurité différents de ceux des équipements couramment utilisés dans le secteur automobile.

Outre les normes relatives aux interventions d'urgence, un alignement avec les symboles et les marquages de danger existants est aussi nécessaire. Si de nouveaux symboles ou marquages sont requis pour le matériel spécifique au transport ferroviaire ZE, les normes et manuels de référence existants relatifs à la reconnaissance des dangers devront également être mis à jour pour intégrer les ajouts spécifiques au transport ferroviaire ZE.

**Lacunes :**

- Des technologies de propulsion ferroviaire ZE présentent des risques uniques qui diffèrent de ceux des véhicules ferroviaires diesel traditionnels, ce qui nécessite une formation spécialisée pour les premiers répondants.
- Les symboles de danger, les marquages et les documents de référence actuels ne comportent pas d'indications spécifiques au transport ferroviaire ZE.

### 5.1.2 Normes et codes spécifiques à l'infrastructure

#### 5.1.2.1 Installations d'entretien

Les installations d'entretien constituent généralement des espaces clos et représentent donc un défi unique lorsqu'elles sont utilisées avec des technologies ZE. Par exemple, les espaces fermés présentent un risque d'accumulation d'hydrogène s'ils abritent des véhicules à hydrogène et un risque de surchauffe dans le cas de véhicules à batterie. Des normes relatives à la conception, au fonctionnement et à l'organisation des installations d'entretien ainsi que des exigences concernant l'infrastructure de ravitaillement et de recharge et d'autres matériels sont nécessaires pour relever les difficultés propres à chaque technologie (p. ex., performances du système de ventilation, outillage sans étincelles, composants électriques, contrôle de la température).

Les véhicules à hydrogène peuvent nécessiter d'être partiellement ou totalement vidés de leur carburant avant d'entrer dans l'installation, en particulier si celle-ci n'a pas été conçue ou modernisée pour accueillir des véhicules à hydrogène, ou avant que certaines opérations d'entretien ne soient effectuées. Le retrait du carburant pourrait devoir se faire à une certaine distance des opérations d'entretien, car certains travaux d'entretien mécanique peuvent provoquer l'apparition de sources d'inflammation. Il faut ensuite ravitailler les véhicules à la fin des travaux, ce qui pourrait également devoir se faire à une certaine distance des opérations d'entretien. Les distances de retrait appropriées entre les installations de ravitaillement en carburant et les installations d'entretien devraient faire l'objet de normes nouvelles ou actualisées.

Il faut également tenir compte de la ventilation dans les installations d'entretien afin d'éviter toute concentration d'hydrogène potentiellement dangereuse si des véhicules à hydrogène présentent des fuites, un dysfonctionnement du matériel ou une réponse adaptée à d'autres risques (p. ex., un incendie externe au véhicule), entre autres possibilités. Les parties intéressées ont noté que les anciennes installations d'entretien bénéficiaient de systèmes de ventilation pour les gaz d'échappement des moteurs diesel, car il était courant d'y faire circuler des locomotives. Les pratiques modernes impliquent l'utilisation d'autres véhicules pour manœuvrer les locomotives à l'intérieur et à l'extérieur des installations d'entretien, ce qui réduit le niveau de ventilation nécessaire. Par conséquent, les systèmes de ventilation existants conçus pour le matériel diesel ne sont probablement pas suffisants pour accueillir en toute sécurité les véhicules à hydrogène et pourraient nécessiter des améliorations. Les véhicules ferroviaires ZE montrent un avantage unique à cet égard, par rapport aux véhicules à diesel uniquement, car ils sont capables de fonctionner sur batterie à l'intérieur de l'installation et n'ont donc pas nécessairement besoin de matériel de navette. Cependant, les batteries et l'état de charge autorisé lorsque le véhicule se trouve dans une installation d'entretien devraient également faire l'objet de normes. Comme pour l'hydrogène, les batteries pourraient devoir être déchargées avant que le véhicule ne soit autorisé à entrer dans l'installation.

La norme NFPA 2 traite des installations d'entretien des véhicules utilisant de l'hydrogène gazeux comprimé comme carburant. Il convient de noter qu'il ne s'agit pas d'un document spécifique au transport ferroviaire, mais que les concepts clés sont similaires. Le chapitre de cette norme qui traite des installations d'entretien indique spécifiquement qu'il ne s'applique pas aux véhicules utilisant de l'hydrogène liquide cryogénique. Les normes existantes relatives à la manipulation des liquides cryogéniques et de l'hydrogène cryogénique devraient donc être révisées et adaptées pour être applicables à l'environnement ferroviaire.

À mesure que la technologie de train à hydrogène évolue, les normes qui répondent à ses exigences de sécurité spécifiques, en particulier pour l'exploitation des installations d'entretien, devront peut-être être adaptées, ou de nouvelles normes être élaborées. Les travaux en cours devraient être axés sur l'atténuation des risques associés à la manipulation de l'hydrogène et sur la sécurité de l'exploitation de ces installations.

De même, les installations d'entretien ou de stockage des batteries pourraient nécessiter des systèmes de surveillance et de contrôle de la température, des systèmes de détection des fuites et de ventilation, ainsi que des systèmes d'extinction des incendies spécifiques à la composition chimique des batteries utilisées et adaptés à la taille et à la capacité ferroviaires prévues. Il pourrait s'avérer nécessaire d'améliorer les systèmes d'extinction d'incendie pour l'hydrogène ou les batteries. Par exemple, l'activation d'un système d'extincteurs automatiques à eau peut ne pas être appropriée dans le cas d'un incendie de batterie ou d'un incendie d'origine électrique.

**Lacunes :**

- Des normes de conception et d'exploitation spécifiques adaptées aux défis particuliers des technologies ZE dans les installations d'entretien fermées.
- Des normes axées sur la prévention de l'accumulation d'hydrogène et sur les risques de surchauffe propres aux véhicules à batterie.
- Des lignes directrices décrivant les procédures de retrait du carburant des véhicules à hydrogène ou de décharge des batteries avant l'entrée, y compris les distances de sécurité entre le ravitaillement en carburant et les activités d'entretien.

- Des lignes directrices pour la modernisation des installations anciennes conçues principalement pour le matériel roulant à moteur diesel afin d'accueillir le matériel roulant à hydrogène et à batterie.
- Des normes de sécurité et d'exploitation spécifiques au transport ferroviaire pour les véhicules utilisant de l'hydrogène liquide cryogénique.
- Des protocoles de sécurité complets pour les installations d'entretien des batteries qui englobent le contrôle de la température, la détection des fuites et des systèmes spécialisés d'extinction des incendies adaptés à la composition chimique des batteries dans les installations ferroviaires.
- Des normes concernant les méthodes d'extinction des incendies appropriées pour les technologies ZE, en soulignant les éléments qui les distinguent des systèmes traditionnels.

#### 5.1.2.2 Ravitaillement en hydrogène

L'échelle des besoins énergétiques, examinée à la section 3.1, s'applique également aux véhicules ferroviaires alimentés à l'hydrogène. Une semi-remorque de classe 8 alimentée par des PAC à hydrogène et utilisant un système de stockage d'hydrogène comprimé dispose de réservoirs pouvant contenir environ 59 kg d'hydrogène [73]. En comparaison, les prototypes de locomotives de manœuvre alimentées à l'hydrogène pourraient stocker jusqu'à 175 kg d'hydrogène, alors que les trains de transport de passagers à unité multiple pourraient en stocker jusqu'à 260 kg [74]. Les trains plus grands et plus lourds, en particulier les trains de marchandises circulant sur de longs itinéraires, auront besoin de beaucoup plus d'hydrogène et, pour augmenter la capacité de stockage, pourraient éventuellement bénéficier de wagons auxiliaires, qui présentent eux-mêmes des lacunes, comme indiqué à la section 5.1.3.3.

Les stations de ravitaillement en hydrogène existantes ne sont pas en mesure d'atteindre des taux de ravitaillement comparables à ceux du diesel. Les discussions avec les personnes interrogées ont montré qu'il ne s'agissait peut-être pas une solution pratique pour relever ce défi, par exemple dans les unités multiples de transport de passagers, y compris en connectant plusieurs distributeurs au véhicule ainsi que plusieurs sous-groupes de stockage d'hydrogène (p. ex., à bord de chaque véhicule). Cette solution n'est peut-être pas pratique pour un déploiement plus large de la technologie, en particulier pour les grandes quantités d'hydrogène nécessaires dans les applications ferroviaires sur de longues distances. Le ravitaillement en hydrogène à grande échelle constitue donc une lacune qui pourrait être comblée par des normes, notamment en ce qui concerne la surveillance de la température du réservoir à bord et la communication avec la station de ravitaillement en hydrogène afin de réaliser en toute sécurité un transfert d'énergie à grande échelle.

Comme indiqué à la section 4.2.2.2, il existe de nombreuses normes concernant les stations et les systèmes de ravitaillement en hydrogène. Nombre d'entre elles sont spécifiques aux applications automobiles (p. ex., SAE J2600, SAE J2799). Les parties intéressées ont indiqué que les équipements de ravitaillement en hydrogène existants sont souvent hors service ou que les processus de ravitaillement sont parfois peu fiables, ce qui se traduit par des remplissages partiels, lents et interrompus. Il s'agit là d'un domaine où des améliorations sont possibles. Les préoccupations des parties intéressées concordent avec les données sur la disponibilité des stations de ravitaillement en hydrogène en Californie publiées par le California Air Resources Board (CARB), qui montrent que la disponibilité des stations de ravitaillement entre le premier trimestre de 2021 et le deuxième trimestre de 2022 a varié entre un minimum de 31 % et un maximum de 95 %, les moyennes trimestrielles se situant dans une fourchette de 58 % à 79 % [75]. Ainsi, au-delà de la nécessité de disposer de stations de ravitaillement de plus grande capacité, des améliorations de la fiabilité et de la performance pourraient également s'avérer nécessaires pour répondre aux besoins des opérateurs ferroviaires et promouvoir l'adoption de l'hydrogène en tant que carburant dans le secteur ferroviaire.

Les discussions avec les experts du secteur ont révélé la nécessité d'actualiser les normes ou d'en créer de nouvelles spécifiquement pour l'alimentation en hydrogène des applications ferroviaires. Ces normes, nouvelles ou actualisées, devraient porter sur la conception, les systèmes et les éléments de contrôle, tels que les buses, les capteurs et les communications,

à une échelle appropriée pour les taux et les quantités d'alimentation requis par les applications ferroviaires pour les différentes technologies de stockage de l'hydrogène, y compris le gaz comprimé à différentes pressions, le gaz liquide, le gaz cryocompressé et les hydrures métalliques.

**Lacune :** Des normes relatives à la conception, aux essais et aux performances des stations de ravitaillement en hydrogène, des distributeurs, des sous-systèmes et des systèmes de ravitaillement embarqués, à l'échelle des quantités requises pour l'exploitation ferroviaire sur de longues distances.

#### 5.1.2.3 Recharge des batteries

En utilisant des carburants traditionnels, le transport de marchandises par chemin de fer pourrait être jusqu'à cinq fois plus efficace sur le plan énergétique que le transport par camion [76]. Malgré leurs avantages sur le plan de l'efficacité par rapport à d'autres modes de transport, les véhicules ferroviaires nécessitent toujours de grandes quantités d'énergie pour se déplacer en raison de leur masse importante. À titre de comparaison, une camionnette électrique nord-américaine de taille normale est équipée d'un bloc-batterie de 98 à 131 kWh [77] et un camion semi-remorque de classe 8 possède des batteries pouvant atteindre 733 kWh [78]. Ces chiffres sont d'un ordre de grandeur inférieur aux spécifications actuellement publiées pour les locomotives à batterie, qui varient de 2 400 kWh [11] à 14 500 kWh [12].

Les batteries de plus grande capacité nécessitent des chargeurs plus puissants pour pouvoir être chargées en un temps raisonnable, de sorte que la charge n'affecte pas le fonctionnement ou l'utilité du véhicule ferroviaire à batterie. Outre la nécessité de disposer de chargeurs plus puissants, les connexions physiques et électriques entre le véhicule et la station de recharge devront être conçues en tenant compte des opérations ferroviaires (p. ex., l'échange de matériel entre opérateurs). Par exemple, un connecteur universel pour les véhicules ferroviaires réduirait considérablement la complexité de leur adoption par les opérateurs de transport de marchandises, qui gèrent fréquemment du matériel qui ne leur appartient pas. L'AAR a lancé une initiative visant à définir une norme de recharge interopérable pour les locomotives électriques à batterie, mais a interrompu ses démarches en avril 2023, estimant qu'il est trop tôt pour définir une norme pour une technologie qui n'a fait l'objet que d'essais limités dans des conditions réelles [68].

Au-delà de la nécessité de disposer de versions plus puissantes des systèmes de charge branchée communs au secteur automobile, le secteur ferroviaire développe et intègre également d'autres formes de charge et de moyens d'électrification, tels que le biberonnage rapide et les systèmes partiellement électrifiés. Le système de tramway QLine de Détroit n'est qu'un exemple de véhicule hybride alimenté par une batterie et une caténaire capable de se recharger dans un système partiellement électrifié [18]. La charge branchée est utilisée pendant la nuit dans le dépôt, le biberonnage permet de recharger les batteries lorsque le véhicule est à l'arrêt dans les stations équipées de barres de charge aériennes et, dans les zones où l'électrification aérienne est installée, la charge de la batterie et l'énergie de traction sont fournies simultanément.

Des normes, nouvelles ou actualisées, seront nécessaires pour traiter des chargeurs de puissance appropriée (p. ex., les systèmes de charge en mégawatt comme dans la norme SAE J3271, en cours d'élaboration) et de leurs composants (p. ex., les câbles de transmission), ainsi que des types de systèmes de charge utilisés dans le secteur ferroviaire, tels que le biberonnage. L'amélioration de la fiabilité du système de charge et de la résistance au vandalisme (p. ex., le vol des câbles de charge dans les stations) pourrait également devoir être abordée dans un contexte ferroviaire, étant donné qu'il s'agit de problèmes connus avec les systèmes de charge automobile existants [79, 80].

Des travaux supplémentaires pourraient s'avérer nécessaires pour aborder la question de la recharge dans les stations accessibles aux passagers ou aux piétons et autour des véhicules, ainsi que la possibilité d'avoir des îlots de recharge en milieu de parcours ou des barres de recharge utilisées pour le biberonnage. En ce qui concerne plus précisément l'emplacement des infrastructures de recharge, il faudra tenir compte de la proximité des infrastructures essentielles (p.

ex., hôpitaux, oléoducs, etc.) en raison du risque d'interférences électromagnétiques. Le matériel existant de recharge en bordure de chemin pourrait être suffisamment alimenté pour permettre des temps de charge pratiques pour les applications ferroviaires.

**Lacune :** Des normes relatives à la conception, aux essais et aux performances des systèmes de recharge des batteries, des connecteurs, des ports et des communications adaptées à la demande d'énergie nécessaire aux applications ferroviaires.

### 5.1.3 Normes et codes spécifiques aux véhicules

#### 5.1.3.1 Résistance aux chocs

La résistance aux chocs et les essais de choc des véhicules ferroviaires utilisant l'énergie motrice ZE ont constitué des sujets d'intérêt pour les personnes interrogées. Les normes existantes traitent des exigences en matière de résistance aux chocs pour les locomotives (p. ex., AAR S-580, AAR S-5506) et des sujets tels que les wagons auxiliaires à GNL (p. ex., AAR M-1004), mais pourraient présenter une applicabilité limitée pour les locomotives ZE alimentées avec une batterie et à l'hydrogène.

Il pourrait s'avérer nécessaire de créer ou de modifier les normes de résistance aux chocs pour les véhicules et les sous-systèmes afin de garantir que les véhicules ZE réagissent de manière suffisamment sécuritaire dans des scénarios de collision et que les risques propres à la force motrice ZE sont pris en compte. La performance des véhicules en cas de choc a besoin d'être comprise en ce qui concerne les composants et le système du véhicule (p. ex., au moyen d'essais destructifs du véhicule). Des normes sont nécessaires pour aider à déterminer la résistance aux chocs des composants et des sous-systèmes ZE individuels, les emplacements et les méthodes de montage des composants montés (p. ex., faisceaux de réservoirs d'hydrogène) et, éventuellement, les forces auxquelles les composants du système ZE sont tenus de résister en cas de collision. Les personnes interrogées ont évoqué la nécessité d'effectuer des essais de choc pour servir de base à ces futures normes. Les normes existantes dans le secteur automobile pourraient ne pas être suffisantes en raison des forces plus élevées rencontrées dans les applications ferroviaires combinées à des exigences plus élevées en matière de stockage d'énergie (p. ex., des dizaines ou des centaines de cylindres de stockage d'hydrogène dans les applications ferroviaires par rapport à un à trois dans les applications automobiles, de même que des batteries ferroviaires ayant une capacité énergétique plus de 100 fois supérieure à celle des batteries automobiles).

**Lacunes :**

- Des normes de résistance aux chocs spécifiques au transport ferroviaire pour les locomotives ZE alimentées par batterie et par hydrogène.
- Des lignes directrices sur le montage et la résistance aux collisions des composants et sous-systèmes ZE.
- Des normes d'essai de collision adaptées aux capacités énergétiques et aux forces propres au transport ferroviaire.

#### 5.1.3.2 Chocs et vibrations

Le fonctionnement dans un environnement ferroviaire expose les systèmes et les composants des véhicules à des chocs et à des vibrations. Ces forces peuvent être d'une ampleur moindre et d'une fréquence plus élevée que les forces d'impact abordées dans la section précédente. Les experts en la matière ont souligné le fait que les opérations ferroviaires normales, y compris l'attelage de locomotives et de wagons à des vitesses autorisées, sont susceptibles de créer des charges de chocs et de vibrations qui dépassent celles créées dans d'autres applications mobiles (p. ex., automobile, véhicules routiers lourds, navires). Il a été noté que, historiquement, l'utilisation de composants provenant d'autres secteurs se traduisait souvent par des performances inadéquates, ce qui a été attribué aux chocs et aux vibrations plus fréquents et plus intenses qui sont courants dans les environnements ferroviaires.

Les technologies ZE conçues à l'origine pour d'autres applications mobiles, notamment les PAC à hydrogène, le stockage de l'hydrogène et les batteries, pourraient être adaptées pour répondre aux besoins de stockage d'énergie et de puissance des applications ferroviaires,

mais il faudrait aussi qu'elles soient suffisamment résilientes et capables de résister aux chocs et aux vibrations plus importants qui caractérisent l'environnement ferroviaire. Les experts en la matière ont indiqué que ce besoin qui pourrait être comblé par la mise à jour des normes existantes ou l'élaboration de nouvelles normes traitant des technologies ZE dans le contexte ferroviaire.

La norme IEC 61373 donne des indications quant à la gestion des chocs et des vibrations. L'Amérique du Nord ne dispose cependant pas d'un équivalent de cette norme qui traite exclusivement des chocs et des vibrations. L'importance des vibrations ne doit pas être sous-estimée, car les fréquences de vibration risquent de déclencher une résonance, entraînant une défaillance catastrophique du système. Les performances et l'intégrité des composants qui constituent le système d'alimentation en carburant doivent être comprises, y compris la tuyauterie de carburant sous pression ainsi que les valves et les raccords pour les véhicules ferroviaires à hydrogène, afin d'assurer un fonctionnement sécuritaire et fiable du véhicule. Il est recommandé d'utiliser des dispositifs de mesure inertielle dans la recherche pour comprendre le comportement des locomotives à piles à combustible à hydrogène sous l'effet des contraintes vibratoires. Des concepts similaires s'appliquent aux systèmes à batterie ; toutefois, le développement dans ce domaine est plus avancé et pourrait donc ne nécessiter que l'incorporation des données dans les normes électriques ferroviaires existantes.

**Lacune :** Des exigences de performance en matière de chocs et de vibrations pour le matériel ZE qui sont spécifiques à l'environnement ferroviaire.

#### 5.1.3.3 Wagons auxiliaires

Les wagons auxiliaires à hydrogène et à batterie permettent de prolonger l'exploitation des véhicules ZE grâce à l'autonomie supplémentaire obtenue par le stockage de l'énergie embarqué et offrent une plus grande souplesse dans les temps de charge ou de ravitaillement. Les wagons auxiliaires pourraient s'avérer particulièrement pratiques lorsque les possibilités de ravitaillement et de recharge sont limitées, soit en raison de l'indisponibilité des infrastructures, soit en raison d'un temps d'immobilisation inadéquat. Les wagons auxiliaires pourraient être utilisés pour le chargement ou le ravitaillement pendant qu'ils sont attelés à la rame, ou encore pour échanger des wagons auxiliaires vides et épuisés contre des wagons pleins. Le temps nécessaire pour échanger un wagon auxiliaire à hydrogène vide ou un wagon auxiliaire à batterie déchargée contre un wagon plein ou chargé pourrait être inférieur au temps nécessaire pour remplir les réservoirs ou charger les batteries elles-mêmes. En échangeant les wagons de ravitaillement, les réservoirs d'hydrogène ou les batteries en attente pourraient être réapprovisionnés sur une période plus longue ou à des moments opportuns, ce qui pourrait prolonger la durée de vie des batteries en les rechargeant à des taux plus faibles et en permettant de les recharger pendant les périodes où les prix de l'électricité sont plus bas. La réduction des taux de charge ou de ravitaillement requis pourrait également entraîner une baisse des coûts d'infrastructure, car les équipements de ravitaillement et de charge plus lents sont généralement moins coûteux.

Le transfert de l'hydrogène entre un wagon auxiliaire et une locomotive a besoin de faire l'objet d'une étude et d'une normalisation plus approfondies, et pourrait nécessiter une approbation réglementaire. Comme la locomotive et le wagon auxiliaire sont des véhicules ferroviaires distincts ayant la possibilité d'être accouplés ou désaccouplés, ils nécessitent des connecteurs pour les flexibles ou les tuyaux qui permettent de transférer le carburant entre eux. Cela introduit un point de défaillance où une fuite pourrait se produire pendant que les véhicules sont branchés. Il existe également un risque de fuite de carburant lors d'un désaccouplement, intentionnel ou non. Étant donné que des problèmes similaires ont dû être résolus pour les wagons auxiliaires de GNL, ces pratiques et normes pourraient servir de base aux wagons auxiliaires pour le gaz comprimé et l'hydrogène liquide. Les normes existantes, telles que la norme AAR M-1004, traitent des wagons auxiliaires à carburant ; cependant, à ce jour, elles ne contiennent pas de dispositions spécifiques pour l'hydrogène ou les batteries. Toutefois, la norme AAR M-1004 contient actuellement un chapitre réservé aux autres types de carburants [58].

Les dimensions actuelles des réservoirs d'hydrogène comprimé ne sont pas idéales pour les quantités de carburant nécessaires aux applications ferroviaires. Actuellement, les applications ferroviaires nécessitent de nombreux réservoirs, ce qui implique un nombre important de valves, de raccords, de connecteurs et de tuyaux, introduisant ainsi de nombreux points de défaillance potentiels dans le système. En particulier dans le cas des applications de wagons auxiliaires, la normalisation des réservoirs de plus grande taille et des composants auxiliaires (p. ex., les valves, les tuyaux, les structures de montage) est requise. La nécessité de disposer de plusieurs cylindres d'hydrogène comprimé pour les applications ferroviaires se manifeste déjà dans les essais de locomotives et d'unités multiples alimentées à l'hydrogène. L'utilisation de centaines de piles et de modules de batteries dans les applications ferroviaires est similaire à ce qui se fait dans le secteur automobile, bien qu'à une échelle beaucoup plus grande, et pourrait nécessiter des normes différentes.

Les auxiliaires de traction (appelés unités B, un concept qui a été utilisé pour les locomotives diesel) pourraient également être utilisés avec de l'hydrogène ou des batteries. Les auxiliaires de traction disposent de leur propre stockage d'énergie et de leurs propres moteurs de traction, mais n'ont pas de cabine. Ils dépendent des commandes d'une locomotive connectée dotée d'une cabine (unité A) pour fonctionner. Comme l'unité B utilise sa propre énergie embarquée, plutôt que de transférer de l'énergie à un autre véhicule, elle contourne les problèmes de transfert d'hydrogène entre véhicules. Bien qu'il existe toujours un potentiel de partage d'électricité entre les unités A et B, le transfert d'électricité entre les unités est similaire à la pratique courante du partage d'électricité dans les trains à unités multiples. Cependant, l'utilisation sécuritaire de ces unités pourrait encore nécessiter des interfaces normalisées, en particulier en ce qui concerne le contrôle et l'état des composants énergétiques (p. ex., l'état de charge de la batterie).

Étant donné que le mouvement de l'électricité à haute tension entre un wagon auxiliaire à batterie et une locomotive est fondamentalement similaire à la mise en place de trains utilisant des limaces (véhicules lourds avec des essieux motorisés, mais sans moteur) ou dans des trains à unité multiple, le transfert de l'électricité n'est pas nécessairement un domaine lacunaire. En revanche, d'autres aspects liés à l'utilisation de wagons auxiliaires à batterie (p. ex., la résistance aux chocs) nécessitent une normalisation.

**Lacunes :**

- Des exigences relatives aux wagons auxiliaires à batterie et aux wagons auxiliaires à hydrogène, notamment en ce qui concerne les connexions et les communications entre les véhicules, en tenant compte des possibilités de ravitaillement ou de recharge des wagons auxiliaires et d'échange de wagons auxiliaires.
- Des exigences pour les unités B alimentées par batterie ou par hydrogène.
- Des exigences pour les grands réservoirs d'hydrogène, y compris leurs composants, tels que les valves, les tuyaux et les structures de montage.

### 5.1.3.4 Autres solutions de stockage de l'hydrogène

Comme indiqué à la section 3.1.2, pour que l'hydrogène soit utile en tant que carburant, il faut le stocker de manière qu'une quantité pratique d'énergie puisse être emmagasinée dans un volume disponible à l'intérieur d'un véhicule ferroviaire. Les applications ferroviaires actuelles utilisent des systèmes d'hydrogène gazeux comprimé [74], et des normes telles que la norme IEC 63341-2 sont en cours d'élaboration pour cette technologie dans les applications ferroviaires. Cependant, le gaz comprimé n'est pas le seul moyen d'augmenter la densité de stockage de l'hydrogène. L'hydrogène liquide cryogénique est déjà utilisé dans certaines applications non ferroviaires, notamment dans les camions-citernes à hydrogène [35] et comme carburant dans les applications spatiales [81].

Les différentes méthodes de stockage de l'hydrogène présentent des risques distincts en raison de leurs propriétés et de leurs exigences uniques. L'hydrogène liquide, stocké à des températures extrêmement basses, présente des risques comme les gelures et la surpression en raison d'une expansion rapide lorsqu'il est réchauffé [82]. L'hydrogène comprimé, stocké sous haute pression, présente des risques de décompression explosive et d'incendie, et, avec le temps, un risque supplémentaire de fatigue des matériaux dans les




**« Pour que l'hydrogène soit utile en tant que carburant, il faut le stocker de manière qu'une quantité pratique d'énergie puisse être emmagasinée dans un volume disponible à l'intérieur d'un véhicule ferroviaire. »**

systèmes de confinement [83]. Le stockage des hydrures métalliques, bien qu'il permette d'éviter certaines des conditions extrêmes de température et de pression, présente des défis de gestion de la chaleur lors de l'absorption et de l'émission d'hydrogène, ainsi que des problèmes liés au poids, à l'efficacité du volume et aux risques chimiques [84].

Un stockage plus dense de l'hydrogène est essentiel à de nombreuses applications ferroviaires afin de parvenir à une commodité opérationnelle similaire à celle du diesel. Il n'existe pas encore de normes spécifiques au transport ferroviaire pour le stockage embarqué de l'hydrogène liquide cryogénique. La portée de la norme IEC 63341-2 ne traite pas du stockage de l'hydrogène liquide. Par conséquent, de nouvelles normes seront nécessaires pour l'utilisation d'autres méthodes de stockage de l'hydrogène dans les applications ferroviaires, y compris des méthodes telles que l'hydrogène liquide cryogénique, l'hydrogène cryo-compressé ou l'hydrure métallique.

**Lacune :** Des exigences pour l'inclusion du stockage de l'hydrogène à bord en utilisant des méthodes de stockage chimique ou physique autres que le gaz comprimé.

### 5.1.3.5 Recyclage et élimination des batteries

Un rapport de recherche du Groupe CSA a déjà décrit le cycle de vie des batteries aux ions lithium pour les VE et identifié les normes (p. ex., ANSI/CAN/UL 1974, SAE J3071) relatives au recyclage et à la réutilisation des batteries [85]. Bien que ce rapport était axé sur l'automobile, les sujets cruciaux et les lacunes identifiés pourraient s'appliquer à l'utilisation de batteries aux ions lithium pour la propulsion ferroviaire, en particulier compte tenu de la quantité de métaux précieux qui seront stockés dans les batteries ferroviaires beaucoup plus volumineuses. Toutefois, la composition chimique des batteries utilisées dans le secteur ferroviaire pourrait différer de celle généralement utilisée dans le secteur automobile. Par exemple, alors que le NMC est une composition chimique couramment utilisée dans le secteur automobile, le lithium-titanate (LTO) est commun dans le secteur ferroviaire. Des pratiques de recyclage et d'élimination différentes pourraient donc s'avérer nécessaires pour tenir compte des différences de matériaux. Pour des batteries de même composition chimique, la fin de vie utile pourrait être atteinte plus tôt.

Étant donné que les applications ferroviaires pourraient se traduire par des cycles plus fréquents de charge et de décharge des batteries que dans d'autres secteurs, la durée de vie utile des batteries ferroviaires, y compris celles de même composition chimique utilisées dans le secteur de l'automobile, pourrait être que de seulement trois à cinq ans, contre dix ans ou plus pour une application automobile typique [86]. Compte tenu de leur taille et de leur durée de vie plus courte, il sera important que ces batteries soient conçues en tenant compte de leur réutilisation et de leur recyclage.

**Lacune :** Des exigences de conception pour les batteries ferroviaires qui intègrent les exigences de réutilisation, de recyclage et d'élimination spécifiques aux compositions chimiques et aux tailles des batteries ferroviaires.

#### 5.1.3.6 Exposition à l'environnement (y compris l'obstruction des conduites d'aération)

Le système ferroviaire nord-américain est soumis à une grande variété de conditions météorologiques et de températures. L'infrastructure et le matériel roulant risquent d'être exposés à des écarts importants de températures, ainsi qu'au vent, à la saleté et aux débris en suspension dans l'air, à la pluie, à la grêle, à la neige, à la glace et à d'autres conditions atmosphériques et météorologiques. Les parties intéressées ont souligné la nécessité d'établir des normes concernant la performance de la technologie ZE dans les conditions météorologiques et les températures très diverses dans lesquelles les véhicules ferroviaires fonctionneront.

Les températures extrêmes sont susceptibles d'entraîner des problèmes imprévus aux composants comme des dysfonctionnements ou une dégradation de leur performance. Par exemple, dans des conditions chaudes, les limiteurs de pression doivent fonctionner de manière que les systèmes à hydrogène puissent évacuer efficacement la surpression générée par l'expansion de l'hydrogène qui se réchauffe, sans pour autant être déclenchés par la seule température extérieure. De plus, le système de ventilation doit garantir que l'hydrogène évacué est transporté hors du véhicule et libéré dans l'environnement, ce qui pourrait poser un problème dans des conditions très froides ou poussiéreuses lors desquelles l'accumulation de glace ou de poussière risque d'obstruer les conduites d'aération. Les problèmes potentiels par temps froid comprennent le blocage des conduites d'évacuation, car les PAC à hydrogène et les moteurs à combustion interne à hydrogène produisent tous deux de l'eau ou de la vapeur d'eau comme produit d'évacuation, ce qui pourrait faire geler et bloquer les conduites d'évacuation ou les évents.

La gestion thermique des batteries est essentielle pour assurer un fonctionnement sécuritaire et leur permettre d'atteindre leur durée de vie opérationnelle. Des systèmes de protection contre la surchauffe et de gestion thermique adaptés à l'environnement ferroviaire devraient être développés pour des conditions définies, indépendamment du système spécifique de gestion thermique déployé (p. ex., refroidissement par l'air ou par un liquide, chauffage). Au-delà de la charge thermique causée par les expositions aux températures extérieures, des exigences pourraient également s'avérer nécessaires pour tenir compte des paramètres de conception, tels que l'emplacement des batteries dans le véhicule (p. ex., sur le toit plutôt qu'à l'intérieur ou sous le véhicule).

En plus des risques causés par les températures ambiantes, les débris présents dans l'environnement qui risquent d'obstruer les orifices d'admission et d'échappement (p. ex., nids d'animaux, poussière, insectes, glace) pourraient également entraîner des problèmes de performance et de sécurité. Des normes spécifiques à l'environnement ferroviaire concernant les systèmes d'admission d'air pourraient donc être élaborées.

De manière générale, les systèmes de technologie ZE mis en œuvre sur les véhicules ferroviaires devront satisfaire à une norme de performance minimale afin de garantir qu'ils sont suffisamment résistants pour supporter l'exposition à des conditions contre lesquelles des technologies similaires, mises en œuvre dans d'autres applications (p. ex., installations stationnaires), peuvent être protégées.

**Lacunes :**

- Des exigences en matière de composants et de systèmes ZE spécifiques aux conditions d'exploitation ferroviaire, y compris les températures extrêmes et les conditions impliquant l'accumulation de glace ou de débris.
- Des exigences relatives au système de gestion de la batterie qui sont spécifiques à l'environnement d'exploitation ferroviaire.

#### 5.1.3.7 Fonctionnement dans des espaces clos

Les services de transport de marchandises et de passagers fonctionnent principalement à l'extérieur et, occasionnellement, dans des espaces clos tels que des tunnels, des gares et des installations d'entretien. Le fonctionnement du matériel ZE dans les espaces clos est un sujet qui nécessite davantage de recherche et de développement, mais aussi l'élaboration de normes et de codes, en raison des risques supplémentaires que

présentent les technologies ZE et des connaissances actuelles limitées concernant les meilleures pratiques pour faire face à ces risques. Ceci est particulièrement important dans le contexte d'événements involontaires comme les accidents et les incendies, qui pourraient entraîner la libération et l'accumulation d'hydrogène ou d'émissions toxiques de la batterie. L'utilisation de matériel ZE dans un train à technologie mixte (p. ex., hydrogène et diesel ou diesel et batteries) ajoute une complexité supplémentaire, car chaque technologie présente des dangers, des stratégies d'atténuation et des mesures d'urgence appropriées qui lui sont propres.

Comme indiqué dans la section 3.1.2.1, l'hydrogène gazeux est plus léger que l'air, ce qui signifie qu'il s'élèvera s'il est libéré d'un réservoir ou d'un système, que ce soit accidentellement ou intentionnellement par un limiteur de pression pour éviter une surpression. Lors d'une utilisation dans des espaces ouverts, ce phénomène est moins préoccupant, à moins qu'une source d'inflammation soit présente à proximité du point d'évacuation de l'hydrogène. En l'absence de source d'inflammation, l'hydrogène s'élève et se dissipe en toute sécurité dans l'atmosphère. Dans un environnement fermé, cependant, l'hydrogène ne parvient pas à se dissiper et se concentre dans la zone confinée, ce qui entraîne un risque d'incendie et d'explosion ou, dans les espaces clos, un risque d'asphyxie. Les normes devront tenir compte de ces facteurs tout en permettant de minimiser le potentiel d'émission d'hydrogène dans un espace clos et en exigeant une ventilation ou des mesures d'atténuation pour l'hydrogène relâché dans un espace clos.

Des recherches et des essais supplémentaires pourraient s'avérer nécessaires pour déterminer les interventions les plus sécuritaires en cas d'incidents impliquant des véhicules à hydrogène dans des espaces clos, par exemple l'émission dirigée de l'hydrogène avec des mesures d'atténuation de l'accumulation et autres dangers, la combustion intentionnelle contrôlée ou d'autres stratégies. De plus, l'émission soudaine d'hydrogène gazeux à haute pression par un limiteur de pression pourrait être bruyante, un danger potentiellement exacerbé dans un espace clos. Il existe des normes d'exposition au bruit en milieu professionnel (p. ex., titre 49 du CFR, partie 227) auxquelles il est possible de se référer pour les limites de bruit. Les stratégies d'atténuation pourraient nécessiter des travaux de recherche et de développement, et des essais.

Les parties intéressées ont fait remarquer que, dans les situations où un train à technologie mixte hydrogène-diesel circule dans un tunnel, la chaleur des gaz d'échappement diesel peut augmenter la température à l'intérieur du tunnel et entraîner une émission involontaire d'hydrogène gazeux en cas de déclenchement des limiteurs de pression activés par la chaleur. Il s'agit d'un autre domaine où de nouvelles normes pourraient s'avérer nécessaires pour permettre l'utilisation sûre de rames utilisant des technologies de propulsion multiples.

**Lacunes :**

- Des recherches et des essais sont nécessaires pour déterminer les meilleures pratiques en matière d'équipement et de processus pour atténuer les risques liés aux batteries et à l'hydrogène dans les espaces clos, ce qui permettra ensuite d'élaborer des normes. Cela pourrait inclure la conception des composants (p. ex., le type, la quantité et l'emplacement des limiteurs de pression sur les réservoirs d'hydrogène montés sur le véhicule et leurs composants) et la conception des sous-systèmes (p. ex., l'orientation et l'emplacement des réservoirs et des batteries à l'intérieur du véhicule).
- Des exigences spécifiques à la technologie ZE en matière de prévention de l'inflammation, de ventilation et d'extinction des incendies pour les infrastructures qui comprennent des espaces clos comme les stations et les tunnels. Certaines informations de la norme NFPA 2 pour les garages d'entretien, qui sont pertinentes pour les petites quantités d'hydrogène dans les automobiles, peuvent nécessiter d'être étendues pour traiter les grandes quantités dans les véhicules ferroviaires.

#### 5.1.3.8 Risques externes

Les véhicules ferroviaires ZE présentent des défis différents de ceux des véhicules diesel en ce qui concerne l'exposition aux risques externes, notamment les incendies, les inondations et le vandalisme. Les batteries sont parfois extrêmement difficiles à éteindre une fois qu'elles se sont enflammées et risquent de s'enflammer à nouveau une fois éteintes [29]. L'hydrogène stocké à bord des véhicules ferroviaires, qu'il s'agisse d'un gaz comprimé ou d'un liquide cryogénique, se dilate et augmente de pression s'il est chauffé. Comme mentionné précédemment, les limiteurs de pression sont intégrés au système pour libérer la pression excédentaire afin d'éviter d'endommager le système. Cela pose toutefois un problème distinct lorsque la source de chaleur qui provoque l'émission d'hydrogène par le limiteur de pression est également une source d'inflammation, telle qu'un incendie adjacent au véhicule. L'émission d'hydrogène dans un incendie existant pourrait aggraver la situation et provoquer un incendie plus important ou un jet de flammes à partir du véhicule. Les normes de conception pourraient contribuer à garantir que les véhicules ferroviaires ZE sont suffisamment résistants à la chaleur causée par les incendies externes. Il se peut que les normes existantes ne soient pas suffisantes ou qu'elles aient besoin d'être étendues pour inclure le matériel ZE (p. ex., la norme NFPA 130 relative à la résistance au feu des planchers du matériel ferroviaire pour le transport de passagers). Enfin, des règlements tels que le *Règlement relatif à l'inspection et à la sécurité des locomotives de chemin de fer* de Transports Canada [66], qui traitent des risques externes tels que l'exposition au feu, pourraient nécessiter une révision et une mise à jour afin d'inclure de manière adéquate les nouvelles technologies zéro émission comme les systèmes alimentés par hydrogène ou par batterie. Les impacts sur les parebrise et les vitres constituent un autre exemple de risques externes inclus dans la réglementation américaine (comme dans le titre 49 du CFR, partie 223). Les règlements existants devront peut-être être adaptés ou étendus pour protéger les autres types de matériels de propulsion situés à l'extérieur de la carrosserie du véhicule (p. ex., sur le toit ou sous le plancher).

**Lacune :** Des normes spécifiques à la technologie ZE pour la conception, les essais et la performance du matériel de stockage d'énergie embarqué et sa capacité à résister aux risques externes tels que les impacts d'objets en suspension dans l'air ou au niveau du chemin, les incendies, les inondations et les actes de vandalisme.

#### 5.1.3.9 Véhicules sans surveillance

En plus des préoccupations existantes concernant tous les véhicules ferroviaires sans surveillance, quelle que soit leur force motrice, les véhicules ferroviaires à hydrogène utilisant des méthodes de stockage de gaz comprimé ou de liquide cryogénique posent des défis uniques. Les deux systèmes sont tenus d'incorporer des limiteurs de pression pour relâcher la pression excédentaire afin d'éviter d'endommager le système. Les limiteurs de pression pourraient se déclencher lorsque le véhicule est en marche ou lorsqu'il est stationné, sans surveillance. Par conséquent, les véhicules ferroviaires alimentés par hydrogène ne devraient pas être laissés dans des espaces clos, à proximité de zones où l'hydrogène émis pourrait s'accumuler, ou à proximité de sources potentielles d'inflammation. Des mises à jour des normes d'exploitation existantes pour les véhicules ferroviaires sans surveillance ou de nouvelles normes spécifiques aux dangers des véhicules ferroviaires alimentés par hydrogène devraient être élaborées.

**Lacune :** Des exigences pour le stockage sécuritaire des véhicules ZE sans surveillance, en particulier ceux qui contiennent de l'hydrogène.

#### 5.1.3.10 Interface conducteur-véhicule

La conception actuelle des véhicules ferroviaires ZE reprend les principes de conception et l'agencement des cabines de locomotives diesel existantes. Les discussions avec les parties intéressées ont révélé une préférence pour le maintien de l'interface de commande du conducteur actuellement utilisée sur l'équipement alimenté au diesel. Cette préférence pourrait être motivée par le désir d'améliorer l'adoption de la technologie tout en réduisant les obstacles associés, par exemple une nouvelle formation pour les conducteurs.

Toutefois, certains aspects des nouvelles technologies de propulsion pourraient ne pas convenir aux interfaces existantes, notamment l'utilisation de la fonction de freinage par récupération. Par exemple, les locomotives à diesel ont une capacité de freinage dynamique (freins électriques via des grilles de résistance) laquelle peut être adaptée au freinage par récupération sans toutefois s'enclencher automatiquement (comme c'est le cas dans les véhicules automobiles ZE) et nécessite une action du conducteur pour s'enclencher. De plus, certains états du matériel ZE devraient probablement être présentés au conducteur (p. ex., l'état de charge de la batterie, ou des informations relatives à la sécurité telles que l'activation du limiteur de pression ou la surchauffe du module de la batterie). Par conséquent, des instruments et des affichages d'information supplémentaires pourraient s'avérer nécessaires sur les véhicules ZE.

**Lacune :** Une interface conducteur-véhicule normalisée comprenant des commandes et des affichages d'information pertinents pour l'équipement ZE, tels que le contrôle du freinage par récupération et l'affichage des informations sur l'état de charge de la batterie.

## 5.2 Feuille de route pour faire progresser la propulsion ZE

Les sections précédentes ont souligné d'une part l'importance des technologies de propulsion ZE pour le transport ferroviaire afin d'aider le Canada et les États-Unis à atteindre leurs objectifs en matière d'émissions et, d'autre part, les domaines dans lesquels les normes et codes existants n'offrent pas une portée suffisante. Il s'ensuit que les normes et codes devront être créés ou mis à jour afin d'assurer la portée nécessaire pour soutenir la mise en œuvre des technologies de propulsion ZE dans les applications ferroviaires. L'élaboration de normes et de codes appropriés n'est pas une tâche facile ; elle nécessite du temps et des ressources. Étant donné que toutes les lacunes identifiées à la section 5.1 peuvent être considérées simultanément, elles ont été classées par ordre de priorité en fonction de leur incidence sur la mise en œuvre des technologies de propulsion ZE pour le transport ferroviaire.

Les lacunes identifiées par la présente recherche, y compris la consultation des parties intéressées, la participation aux ateliers et les réponses à l'enquête, ont été évaluées en fonction de leur importance et de leur urgence par rapport à leur incidence sur la mise en œuvre des technologies de propulsion ZE pour le transport ferroviaire. Les lacunes ont ensuite été répertoriées par domaine ; elles sont présentées à la figure 6 ci-dessous. La position de chaque domaine représentant des lacunes dans le graphique est approximative et peut différer selon que les lacunes sont considérées dans le contexte du transport ferroviaire de marchandises ou de passagers.

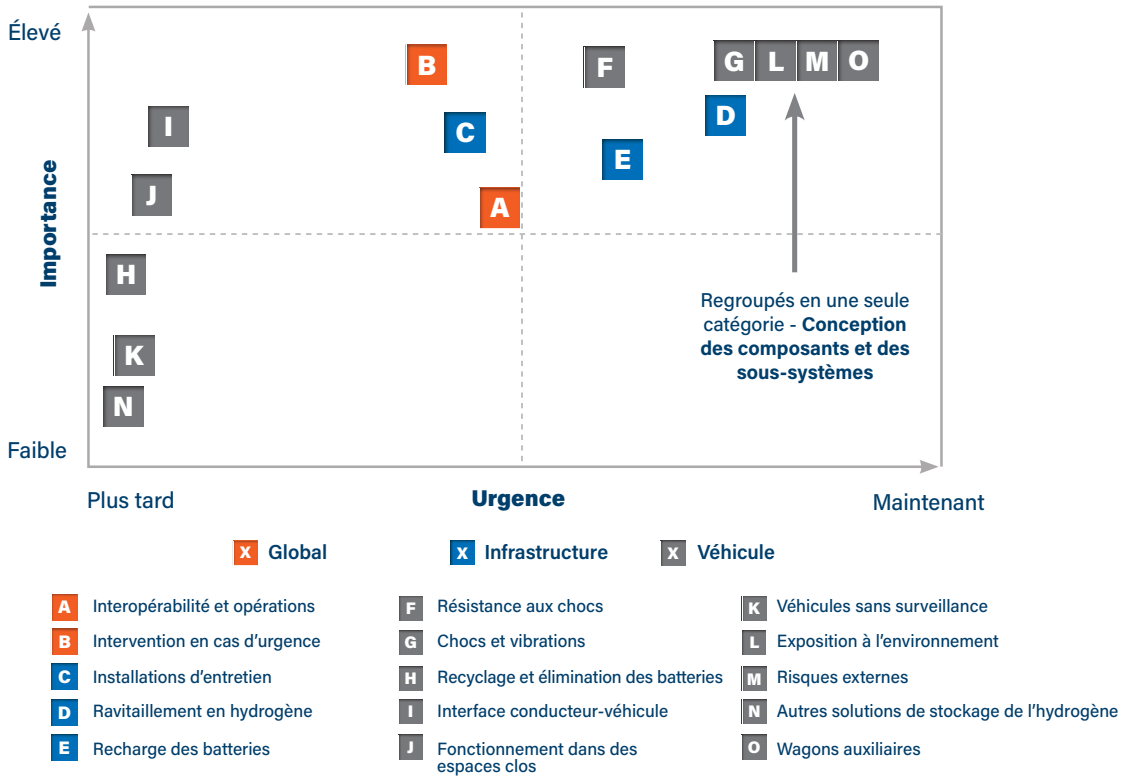
Il est important de noter que de nombreuses lacunes sont liées à d'autres domaines ou en dépendent. Par exemple, l'interopérabilité repose sur la normalisation d'autres concepts, tels que le ravitaillement en hydrogène, la recharge des batteries et les interfaces de commande, afin de définir des conceptions et des pratiques communes. De même, certaines lacunes décrites à la section 5.1 pourraient être regroupées ici de manière plus générale. Par exemple, les lacunes concernant les chocs et les vibrations, les wagons auxiliaires, l'exposition aux éléments et à la température, et la conception pour les risques externes pourraient être regroupées en tant que conception de composants et de sous-systèmes pour l'environnement ferroviaire.

Les lacunes prioritaires définies comme étant d'une grande importance et d'une grande urgence se situent dans le quadrant supérieur droit de la figure 6. L'inclusion de ces lacunes à des normes et des codes nouveaux ou mis à jour aurait probablement la plus grande incidence sur la mise en œuvre des technologies de propulsion ZE dans un contexte ferroviaire. Une discussion sur les lacunes prioritaires est présentée ci-dessous.

### 5.2.1 Conception des composants et des sous-systèmes pour l'environnement ferroviaire

L'une des principales préoccupations des parties intéressées était l'absence de technologies ZE construites selon des normes spécifiques au transport ferroviaire ou conçues spécifiquement pour l'environnement ferroviaire, et l'incidence de cette lacune sur la mise en œuvre de cette technologie. La majorité des composants et sous-

**Figure 6 :** Lacunes identifiées dans les normes et codes existants, classées par ordre d'importance et d'urgence




systèmes ZE étant conçus pour les applications automobiles légères, les principaux moteurs de la normalisation des composants et des sous-systèmes spécifiques au transport ferroviaire incluent l'environnement ferroviaire, comparativement plus difficile, l'augmentation de la taille et des exigences de performance, et les durées d'exploitation plus longues.

Il y a une volonté claire de concevoir des systèmes spécifiques au transport ferroviaire, tels que les PAC à hydrogène, les systèmes de stockage et de distribution d'hydrogène, les batteries et les wagons auxiliaires, ainsi que des exigences de conception, par exemple pour la résistance aux chocs et aux vibrations, l'exposition aux éléments et à la température, et la résilience face aux risques externes. Cette lacune est particulièrement importante en raison de l'incidence qu'elle aurait sur d'autres lacunes importantes, notamment en matière de résistance aux chocs et d'interopérabilité.

### 5.2.2 Résistance aux chocs

La sécurité constitue une priorité pour toutes les organisations ferroviaires en Amérique du Nord, et de nombreuses normes et règlements ont été élaborés pour garantir la sécurité du système ferroviaire. Pour que la technologie ZE soit déployée avec succès, il est essentiel que l'exploitation soit sécuritaire et que les risques soient atténués. Comme indiqué dans la section 5.1.3.1, les normes existantes comprennent des exigences en matière de résistance aux chocs pour les locomotives et les wagons auxiliaires de GNL. De plus, pour fonctionner dans le système ferroviaire nord-américain, les véhicules ferroviaires ZE (locomotives et unités multiples) sont tenus de respecter les exigences de conformité de chaque autorité compétente, régies par exemple par TC et la FRA.

Il sera nécessaire de comprendre la résistance aux chocs des véhicules ferroviaires ZE, ainsi que les

normes selon lesquelles les véhicules pourraient être fabriqués et testés afin de garantir leur conformité. Ces normes s'étendent à tous les nouveaux composants, aux sous-systèmes et à leur intégration dans des parties bien établies des véhicules ferroviaires, par exemple, la résistance à l'impact des piles, des chaînes et des modules de batteries, la gestion thermique et énergétique, le système de stockage de l'énergie et l'installation sur le véhicule ferroviaire. L'extension des normes de résistance aux chocs et leur adaptation à la nouvelle technologie ZE sont importantes pour une mise en œuvre réussie. Par exemple, les exigences structurelles pour les réservoirs diesel montés sous le plancher pourraient éventuellement être adaptées afin d'inclure les exigences structurelles pour les batteries ou le stockage d'hydrogène montés sous le plancher. Inversement, si ces systèmes sont installés à des endroits différents (p. ex., sous le capot long), la norme pourrait être modifiée. De même, l'exigence structurelle pour les wagons auxiliaires de GNL pourrait s'appliquer aux technologies ZE. Dans certains cas, il pourrait s'avérer nécessaire d'élaborer des normes entièrement nouvelles pour répondre aux attentes rigoureuses des chemins de fer, du secteur et des autorités réglementaires en matière de sécurité.

### 5.2.3 Ravitaillement en hydrogène

Comme indiqué à la section 5.1.2.2, la combinaison des exigences en matière de capacité de stockage de l'énergie et des créneaux horaires courts pour le ravitaillement afin de permettre une utilisation similaire et efficace de la force motrice nécessite des systèmes de ravitaillement de grande capacité. Alors qu'il est possible de construire et de ravitailler les premiers véhicules prototypes et les parcs moins exigeants en utilisant des technologies conçues pour d'autres applications, telles que les autobus ou les camions lourds, les véhicules de train à hydrogène de série pourraient bénéficier d'une technologie spécifique de ravitaillement en hydrogène.

Les normes de ravitaillement en hydrogène pourraient contribuer à accroître l'adoption du train à hydrogène. En l'absence de telles normes, il existe un risque d'incompatibilité entre les véhicules hybrides de différents chemins de fer ou fabricants en raison de la diversité des systèmes de ravitaillement. Ce manque d'uniformité pourrait rendre difficile le partage ou la mise à l'échelle de ces véhicules, entravant ainsi leur interopérabilité. Ces normes pourraient également empêcher l'obsolescence précoce forcée de la première génération de véhicules de train à hydrogène, si les normes sont suffisamment robustes pour que les systèmes de ravitaillement restent inchangés pendant une longue période. La normalisation du ravitaillement pourrait inclure différents systèmes de stockage à bord, tels que le gaz comprimé et le liquide, pour une variété d'applications du secteur ferroviaire (p. ex., transport de marchandises sur de longues distances, trains de banlieue, trains légers).

### 5.2.4 Recharge des batteries

Comme pour l'alimentation en hydrogène, la recharge des batteries dans un contexte ferroviaire, comme indiqué dans la section 5.1.2.3, nécessitera des systèmes plus puissants que ceux qui existent actuellement pour d'autres applications, telles que les camions lourds. Les systèmes de recharge normalisés pourraient offrir des avantages similaires à ceux des systèmes de ravitaillement en hydrogène normalisés, en facilitant l'interopérabilité et en élargissant le réseau potentiel pour l'utilisation d'un véhicule ferroviaire électrique à batterie. De même, ces normes pourraient contribuer à éviter l'obsolescence ou des modernisations importantes des véhicules ferroviaires électriques à batterie de première génération en garantissant leur compatibilité avec les futurs systèmes de recharge grâce à la stabilité offerte par les normes. Un autre avantage pourrait être que les différentes compositions chimiques des batteries embarquées pourraient être prises en charge en toute sécurité par le même chargeur, ou que les interfaces mécaniques et électriques d'un chargeur pourraient fonctionner avec des véhicules à moteur de différents fabricants, à l'instar des développements en cours dans le domaine de la compatibilité des chargeurs dans le secteur de l'automobile.

### 5.2.5 Interopérabilité

L'interopérabilité n'a pas été incluse dans le quadrant supérieur droit de la figure 6 ; cependant, les recherches et la consultation des parties intéressées ont montré qu'elle constituera un élément clé de la mise en œuvre des technologies de propulsion ferroviaire ZE, en particulier dans le contexte du transport ferroviaire de marchandises. La principale

raison pour laquelle l'interopérabilité n'a pas été incluse dans le quadrant supérieur droit est que, comme expliquée précédemment, elle repose sur la normalisation d'autres domaines. En normalisant le ravitaillement en hydrogène ou la recharge des batteries et les interfaces conducteur-véhicule, par exemple, l'interopérabilité sera intégrée au système. Ainsi, notamment dans le contexte du transport de marchandises, les véhicules de traction sont souvent exploités sur des réseaux de chemins de fer autres que ceux de leurs propriétaires afin de permettre une utilisation efficace des actifs. L'interopérabilité s'avère donc essentielle à la réussite de la mise en œuvre de la technologie ZE sur l'ensemble du réseau ferroviaire.

# 6 Conclusions

Les technologies ZE connaissent une progression et une mise en œuvre rapides dans toute une série de secteurs et de cas d'utilisation, et elles joueront un rôle essentiel dans les efforts de décarbonation à l'échelle mondiale. Alors que ces technologies sont plus développées dans certains secteurs, tels que l'automobile et l'alimentation électrique fixe, leur application dans un contexte et un environnement d'exploitation spécifiques au transport ferroviaire était limitée jusqu'à présent. Pour répondre aux besoins du secteur ferroviaire nord-américain, les technologies de propulsion ZE doivent pouvoir fonctionner de manière sécuritaire et fiable dans des climats extrêmes, à des températures fluctuantes, dans des formats plus grands que ceux utilisés dans les applications automobiles, et en faisant face à plus de risques que ceux prévus dans les applications fixes. Des systèmes de grande taille, puissants et robustes sont nécessaires pour répondre aux besoins énergétiques considérables d'un véhicule ferroviaire, et l'infrastructure de soutien de ces véhicules devra être modifiée pour s'adapter aux nouvelles technologies. Ce rapport a permis d'identifier les lacunes dans les normes et codes existants applicables au système ferroviaire dans son ensemble, et plus spécifiquement à l'infrastructure et aux véhicules.

La sécurité est d'une importance capitale et constitue une priorité dans tous les aspects de l'exploitation des chemins de fer. Elle se présente donc comme le thème central des lacunes spécifiques à l'environnement d'exploitation ferroviaire. Au-delà de la nécessité d'assurer la sécurité de l'exploitation dans tous les environnements (p. ex., dans les gares, les installations, les tunnels), la conception et l'interopérabilité du matériel et de l'infrastructure (du système jusqu'aux sous-composants individuels), le ravitaillement en carburant et la recharge, l'intervention d'urgence et les processus opérationnels ont été identifiés comme des domaines nécessitant l'élaboration de normes et de codes spécifiques au transport ferroviaire.

Avec l'apparition, sur le marché ferroviaire nord-américain, de prototypes de véhicules pilotes équipés de technologies ZE, il est probable que ces technologies feront bientôt partie de l'environnement d'exploitation des transports ferroviaires. Pour faire progresser l'utilisation de ces technologies et faciliter la transition vers l'abandon des carburants traditionnels, il est nécessaire d'adopter une approche méthodique et organisée en ce qui concerne l'élaboration de normes spécifiques au transport ferroviaire pour les technologies ZE.

Chaque lacune identifiée dans les normes et codes existants a été évaluée en fonction de son importance et de son degré d'urgence par rapport au développement, à la mise en œuvre et à l'adoption éventuelle des technologies dans le secteur ferroviaire. Étant donné que la mise en œuvre des véhicules pilote ZE et les opérations de validation du concept ont déjà commencé, la conception de composants et de sous-systèmes spécifiques à l'environnement ferroviaire est considérée comme une priorité élevée parmi les lacunes identifiées. La conception des composants et des sous-systèmes, y compris à l'intérieur du véhicule, l'équipement de recharge et de ravitaillement, et l'infrastructure de soutien essentielle nécessitent d'être précisées afin d'assurer un fonctionnement sécuritaire et fiable dans un contexte ferroviaire. En comblant ces lacunes critiques, les technologies de propulsion ZE auront plus de chances de susciter l'intérêt du marché et d'être acceptées par les autorités réglementaires. De plus, des composants et des sous-systèmes bien conçus pourraient faciliter l'élaboration de codes et de normes concernant les autres lacunes importantes : résistance aux chocs, ravitaillement en carburant et interopérabilité.

# Références


[1] Transports Canada, « Les transports au Canada 2021 », juin 2022. Consulté le : 12 décembre 2023. [En ligne]. Disponible : https://tc.canada.ca/fr/services-generaux/transparence/gestion-rapports-ministeriels/rapports-annuels-transports-canada/2021/emissions-gaz-effet-serre

[2] United States Environmental Protection Agency Office of Transportation and Air Quality, "Fast Facts U.S. Transportation Sector Greenhouse Gas Emissions 1990-2020," US EPA, mai 2022. Consulté le : 12 déc. 2023. [En ligne]. Disponible : https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P10153PC.pdf

[3] « Inventaire canadien des émissions de polluants atmosphériques ». Gouvernement du Canada. https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/fa1c88a8-bf78-4fcb-9c1e-2a5534b92131 (consulté le : 11 décembre 2023)

[4] Association des chemins de fer du Canada, « Rapport de surveillance des émissions des locomotives 2020 ». Consulté le : 11 décembre 2023. [En ligne]. Disponible : https://www.railcan.ca/wp-content/uploads/2022/08/RAC-LEM-REPORT-2022-FR.pdf

[5] Gouvernement du Canada, « Plan de réduction des émissions pour 2030 : Un air pur, et une économie forte », décembre 2023. Consulté le : 12 décembre 2023. [En ligne]. Disponible : https://www.canada.ca/fr/services/environnement/meteo/changementsclimatiques/plan-climatique/survol-plan-climatique/reduction-emissions-2030.html

[6] United States Department of State, "The Long-Term Strategy of the United States, Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050," novembre 2021. Consulté le : 11 mai 2023. [En ligne]. Disponible : https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/10/US-Long-Term-Strategy.pdf

[7] Ressources naturelles Canada, « Stratégie canadienne pour l'hydrogène, Saisir les possibilités pour l'hydrogène, Appel à l'action », décembre 2020. Consulté le : 11 mai 2023. [En ligne]. Disponible : https://ressources-naturelles.canada.ca/sites/nrcan/files/environment/hydrogen/NRCan_Hydrogen%20Strategy%20for%20Canada_Final%20MINO%20edits%20Dec%2016%20French_clean_lowaccessible.pdf

[8] R. C. Lauby, "Federal Railway Administration - Files," août 2013. Consulté le : 12 déc. 2023. [En ligne]. Disponible : https://railroads.dot.gov/sites/fra.dot.gov/files/fra_net/14001/13-021120%20Final%20letter%20and%20enclosure%20%282%29.pdf

[9] « Loi sur la sécurité ferroviaire (L.R.C. [1985], ch. 32 [4e suppl.)) ». Gouvernement du Canada. https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/lois/r-4.2/ (consulté le : 11 décembre 2023)

[10] "About FRA." US Department of Transportation Federal Railroad Administration. https://railroads.dot.gov/about-fra/about-fra (consulté le : 12 déc. 2023)

[11] "FLXdrive, Battery-Electric Locomotive Technology." Wabtec Corporation. https://www.wabteccorp.com/locomotive/alternative-fuel-locomotives/flxdrive (consulté le : 27 mars 2023)

[12] "Coming Soon: The World's Largest Batttery Electric Vehicle." EMD Joule. https://www.progressrail.com/en/Segments/RollingStock/Locomotives/FreightLocomotives/EMDJoule.html (consulté le : 27 mars 2023)

[13] « Il continue simplement à rouler lorsque la caténaire s'arrête: le FLIRT Akku ». Stadler Rail AG. https://www.stadlerrail.com/fr/flirt-akku/details/ (consulté le : 12 décembre 2023)

[14] "Mireo Plus B – A pioneering step into the future." Siemens Mobility. https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rolling-stock/commuter-and-regional-trains/mireo/mireo-plus-b.html (consulté le : 11 déc. 2023)

[15] "Liberty Modern Streetcar." Brookville. https://www.brookvillecorp.com/products/streetcars/modern-streetcars/ (consulté le : 11 déc. 2023)

[16] Alstom, "Alstom presents its battery-powered multiple unit train in Saxony," sept. 2021. Consulté le : 21 mars 2023. [En ligne]. Disponible : https://www.alstom.com/press-releases-news/2021/9/alstom-presents-its-battery-powered-multiple-unit-train-saxony

[17] "Technology." Tig/m. https://tig-m.com/technology (consulté le : 21 mars 2023)

[18] E. D. Lawrence, "Take a look inside Detroit's new QLINE streetcar," Detroit Free Press, Détroit, sept. 2016. Consulté le : 11 déc. 2023. [En ligne]. Disponible : https://www.freep.com/story/news/local/michigan/detroit/2016/09/21/qline-car-detroit-m1-rail/90786964/

[19] K. Wang, D. Ouyang, X. Qian, S. Yuan, C. Chang, J. Zhang et Y. Liu, "Early Warning Method and Fire Extinguishing Technology of Lithium-Ion Battery Thermal Runaway: A Review," Energies, vol. 16, no 7, 2023.

[20] IEA, "Global EV Outlook 2023," IEA, Paris, 2023. Consulté le : 11 déc. 2023. [En ligne]. Disponible : https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023

[21] D. D. Friel, "Management of Batteries for Electric Traction Vehicles," dans Electric and Hybrid Vehicles, Elsevier, 2010, p. 493-515.

[22] GM, "GM Reveals New Ultium Batteries and a Flexible Global Platform to Rapidly Grow its EV Portfolio," General Motors, mars 2020. Consulté le : 27 mars 2023. [En ligne]. Disponible : https://news.gm.com/newsroom.detail.html/Pages/news/us/en/2020/mar/0304-ev.html

[23] "Volkswagen of America Inc., Why battery power will drive the future of transportation," Volkswagen of America Inc., 10 mai 2022. Consulté le : 27 mars 2023. [En ligne]. Disponible : https://www.vw.com/en/newsroom/everything-electric/batteries.html

[24] Porsche AG, « Gestion thermique sophistiquée, tension du système de 800 volts », Porsche AG, 2022. Consulté le : 27 mars 2023. [En ligne]. Disponible : https://media.porsche.com/mediakit/taycan/fr/porsche-taycan/die-batterie

[25] M. R. Zemaitis, L. A. Foris, R. A. Lopez et M. R. Huecker, "Electrical Injuries," StatPearls Publishing LLC, 9 sept. 2022. Consulté le : 9 mars 2023. [En ligne]. Disponible : https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK448087/#:~:text=High%2Dvoltage%20current%20(greater%20than,which%20most%20household%20currents%20exist

[26] R. T. Long et A. M. Misera, "Sprinkler Protection Guidance for Lithium-Ion Based Energy Storage Systems," Fire Protection Research Foundation – National Fire Protection Agency, juin 2019. Consulté le : 11 déc. 2023. [En ligne]. Disponible : https://cdn.barkbuilder.com/files/classicfls/NFPA_-_Lithium-Ion_Based_Energy_Storage_Systems-SprinklerProtection_Report.pdf

[27] R. Gupta, S. S. Bahga et A. Gupta, "Effect of Ambient Temperature and Discharge Current on Thermo-Electrochemical Behaviour of Lithium-Ion Cells Using Surrogate Modelling and Analysis," Journal of The Electrochemical Society, vol. 170, no 6, 19 juin 2023.

[28] S. Yuan, C. Chang, S. Yan, P. Zhou, X. Qian, M. Yuan et K. Liu, "A review of fire-extinguishing agent on suppressing lithium-ion batteries fire," Journal of Energy Chemistry, vol. 62, 2021.

[29] L. Zhang, K. Jin, J. Sun et Q. Wang, "A Review of Fire-Extinguishing Agents and Fire Suppression Strategies for Lithium-Ion Batteries Fire," Fire Technology, p. 1-42, 2022.

[30] "Hydrogen," Royal Society of Chemistry, 2023. https://www.rsc.org/periodic-table/element/1/hydrogen (consulté le : 23 mars 2023)

[31] "Fuel Properties Comparison." US Department of Energy. https://afdc.energy.gov/fuels/properties?fuels=DS,HY (consulté le : 5 mai 2023).

[32] "Basic Hydrogen Properties." Hydrogen Tools. https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-data/basic-hydrogen-properties (consulté le : 5 juin 2023)

[33] Innovation, Sciences et Développement économique Canada, « Facteurs de correction du volume – carburant diesel », juillet 2018. Consulté le : 5 juin 2023. [En ligne]. Disponible : https://www.ic.gc.ca/eic/site/mc-mc.nsf/vwapj/FCV_Diesel.pdf/$file/FCV_Diesel.pdf

[34] Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, "High-Pressure Hydrogen Tank Testing," U.S. Department of Energy, Washington, https://www.energy.gov/eere/fuelcells/high-pressure-hydrogen-tank-testing

[35] "Liquid Hydrogen Delivery." Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. https://www.energy.gov/eere/fuelcells/liquid-hydrogen-delivery (consulté le : 5 avr. 2023)

[36] BMW Group, "BMW Introduces World's First Hydrogen-Drive Luxury Performance Car for Everyday Use – The BMW Hydrogen 7," 12 sept. 2006. Consulté le : 12 avr. 2023. [En ligne]. Disponible : https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0012215EN/bmw-introduces-world-s-first-hydrogen-drive-luxury-performance-car-for-everyday-use-the-bmw-hydrogen-7?language=en

[37] T. Flynn, "Refrigeration and Liquefaction - Large Systems," dans Cryogenic Engineering, Revised and Expanded, Boca Raton, CRC Press, 2004, p. 401.

[38] Airbus, "How to store liquid hydrogen for zero-emission flight," 10 déc. 2021. Consulté le : 10 avr. 2023. [En ligne]. Disponible : https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2021-12-how-to-store-liquid-hydrogen-for-zero-emission-flight

[39] "Hydrogen Storage." Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. https://www.hydrogen.energy.gov/storage.html (consulté le : 20 juin 2023)

[40] O. Barrera, D. Bombac, Y. Chen, T. D. Daff, E. Galindo-Nava, P. Gong, D. Haley, R. Horton, I. Katzarov, J. R. Kermode, C. Liverani, M. Stopher et F. Sweeney, "Understanding and mitigating hydrogen embrittlement of steels: a review of experimental, modelling and design progress from atomistic to continuum," J. Mater. Sci., vol. 53, no 9, p. 6251-6290, 2018.

[41] "Fuel Cells." Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells (consulté le : 20 juin 2023)

[42] "Comparison of Fuel Cell Technologies." Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. https://www.energy.gov/eere/fuelcells/comparison-fuel-cell-technologies (consulté le : 15 mars 2023)

[43] "Fuel Cell Electric Vehicles." US Department of Energy Vehicle Technologies Office. https://afdc.energy.gov/vehicles/fuel_cell.html (consulté le : 22 mars 2023)

[44] Y. Wang, H. Yuan, A. Martinez, P. Hong, H. Xu et F. R. Bockmiller, "Polymer electrolyte membrane fuel cell and hydrogen station networks for automobiles: Status, technology, and perspectives," Adv. Appl. Energy., vol. 2, 2021.

[45] "Types of Fuel Cells." Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. https://www.energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells (consulté le : 20 juin 2023)

[46] M. Hegazi, "Fuel Cell Battery Hybrid (Hydrail) Propulsion for Zero Emissions Freight Switching Locomotives: Duty Cycle Construction, Component Sizing, and Low Power Vehicle Prototyping," The University of British Columbia, Kelowna, 2022.

[47] « Moteurs à hydrogène ». Cummins. https://www.cummins.com/fr/engines/hydrogen (consulté le : 15 mai 2023).

[48] "JCB: Building a Hydroge Future." JCB. https://www.jcb.com/en-gb/campaigns/hydrogen (consulté le : 15 mai 2023)

[49] "New system retrofits diesel engine to run on 90 per cent hydrogen," 6 oct. 2022. [En ligne]. Disponible : https://newsroom.unsw.edu.au/news/science-tech/new-system-retrofits-diesel-engines-run-90-cent-hydrogen (consulté le : 15 mai 2023)

[50] M. L. Wright et A. C. Lewis, "Decarbonisation of heavy-duty diesel engines using hydrogen fuel: a review of the potential impact on NOx emissions," Environmental Science: Atmospheres, vol. 2, p. 852-866, 2022.

[51] A. Shmaryahu, N. Amar, A. Ivanov et I. Aharon, "Sizing procedure for system hybridization based on experimental source modeling for electric vehicles," Energies, vol. 14, no 17, 2021.

[52] « Coradia iLint – le premier train de passagers à hydrogène au monde ». Alstom. https://www.alstom.com/fr/solutions/materiel-roulant/coradia-ilint-le-premier-train-de-passagers-hydrogene-au-monde (consulté le : 15 mai 2023)

[53] M. Luczak, "CP's Hydrogen Locomotive Program Advances," Railway Age, 7 mars 2023. Consulté le : 15 mai 2023. [En ligne]. Disponible : https://www.railwayage.com/mechanical/locomotives/cps-hydrogen-locomotive-program-advances/

[54] Hyundai, "XCIENT Fuel Cell Truck," [Online]. Disponible : https://ecv.hyundai.com/global/en/products/xcient-fuel-cell-truck-fcev/ (consulté le : 15 mai 2023)

[55] M. Luczak, "Progress Rail Offering Diesel-Battery-Electric Hybrids," Railway Age, 21 sept. 2022. Consulté le : 15 sept. 2023. [En ligne]. Disponible : https://www.railwayage.com/mechanical/locomotives/progress-rail-offering-diesel-battery-electric-hybrids/

[56] M. Hernandez, M. Rossetto, W. Skrivan, F. Girard, N. Sheibley, C. Decès-Petit et S. Brueckner, "NRCan Hydrogen Codes and Standards Gap Analysis Project," National Research Council Canada, 2022.

[57] M. Hernandez, I. Jimenez et C. Rabbitt, "Risk Assessment of Hydrogen and Battery Power in Locomotives – Part 3 - Codes and Standards," National Research Council Canada, 2022.

[58] B. D. Ehrhart, L. E. Klebanoff, J. A. Mohmand et C. Markt, "Study of Hydrogen Fuel Cell Technology for Rail Propulsion and Review of Relevant Industry Standards," U.S. Department of Transportation Federal Railroad Administration, Washington, DC, 2021.

[59] J. Bull et D. Fitzgerald, "RSSB Hydrogen Policy and Standards Review," Rail Safety and Standards Board, 2022.

[60] "Hydrogen Tools." Pacific Northwest National Laboratory. https://h2tools.org/ (consulté le : 15 mars 2023)

[61] "Battery Standards." EnergyVille. https://batterystandards.info/ (consulté le : 15 mars 2023)

[62] "Fuel Cell Systems." Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cell-systems (consulté le : 20 juin 2023)

[63] US DOT Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, "Emergency Response Guidebook," U.S. Department of Transportation, Washington, 2016.

[64] M. Runefors et E. Egardt, "Tactical Depressurization of Hydrogen And CNG Tanks Using Rifles And Other Projectiles," Swedish Civil Contingencies Agency, Karlstad, 2021.

[65] B. O'Connor, "Explosions, Deflagrations, and Detonations," National Fire Protection Association, Quincy, 2023. Consulté le : 20 juin 2023. [En ligne]. Disponible : https://www.nfpa.org/News-and-Research/Publications-and-media/Blogs-Landing-Page/NFPA-Today/Blog-Posts/2023/03/27/Explosions-vs-Deflagrations-vs-Detonations

[66] Transports Canada, « Règlement relatif à l'inspection et à la sécurité des locomotives de chemin de fer », Ottawa, 2022. Consulté le : 15 décembre 2023. [En ligne]. Disponible : https://tc.canada.ca/fr/transport-ferroviaire/regles/2022-2023/reglement-relatif-inspection-securite-locomotives-chemin-fer

[67] "Physical Hydrogen Storage." Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. https://www.energy.gov/eere/fuelcells/physical-hydrogen-storage (consulté le : 20 juin 2023)

[68] M. Fore, "AAR Standards Activities Update for the FRA Decarbonization Workshop," Federal Railroad Administration, Denver, 2023. Consulté le : 15 déc. 2023. [En ligne]. Disponible : https://railroads.fra.dot.gov/sites/fra.dot.gov/files/2023-06/AAR%20Activities%20-%20Alternative%20Fuel%20Standards%20Development%20%26%20Locomotive%20Battery%20Charging%20Infrastructure.pdf

[69] W. Sölken, "Generic Marking Standards and Requirements," weremac.org, 2023, https://www.wermac.org/flanges/marking_requirements_flanges_fittings_pipes_valves_fasteners.html (consulté le : 20 juin 2023)

[70] Gouvernement du Canada, « Guide des mesures d'urgence », Transports Canada, Ottawa, 2020. Consulté le : 15 décembre 2023. [En ligne]. Disponible : https://tc.canada.ca/fr/marchandises-dangereuses/canutec/guide-mesures-urgence

[71] Gouvernement du Canada, « Transport des marchandises dangereuses (TMD) – Documents d'expédition (transport routier) », Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail, Ottawa, 2022. Consulté le : 15 décembre 2023. [En ligne]. Disponible : https://www.cchst.ca/oshanswers/legisl/tdg/tdg_safetymarks.html

[72] "Battery Collection Best Practices and Battery Labeling Guidelines." US Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/infrastructure/battery-collection-best-practices-and-battery-labeling-guidelines (consulté le : 15 déc. 2023)

[73] "T680 fuel cell electric vehicle." Kenworth. https://kenworth.com/trucks/t680-fcev/ (consulté le : 29 juin 2023)

[74] M. Bohm, A. F. Del Rey, J. Pagenkopf, M. Varela, S. Herwartz-Polster et B. N. Calderon, "Review and comparison of worldwide hydrogen activities in the rail sector with special focus on on-board storage and refuelling technologies," Int. J. Hydrogen Energy, vol. 47, p. 38003-38017, 2022.

[75] California Air Resources Board, "2022 Annual Evaluation of Fuel Cell Electric Vehicle Deployment and Hydrogen Fuel Station Network Development," California Air Resources Board, Sacramento, 2022. Consulté le : 15 déc. 2023. [En ligne]. Disponible: https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2022-09/AB-8-Report-2022-Final.pdf

[76] D. Tolliver, P. Lu et D. Benson, "Comparing rail fuel efficiency with truck and waterway," Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 24, p. 69-75, 2013.

[77] « 2023 F-150 Lightning XLT ». Ford Motor Company. https://fr.ford.ca/trucks/f150/f150-lightning/models/f150-xlt/ (consulté le : 20 juin 2023)

[78] Nikola Corporation, "TRE BEV specifications," 2023. [En ligne]. Disponible : https://nikolamotor.com/the-nikola-tre-bev-reinventing-short-haul-transportation/ (consulté le : 20 juin 2023)

[79] "EV Charging Cable Theft." Office of Energy Saver. https://www.energy.gov/energysaver/ev-charging-cable-theft (consulté le : 15 déc. 2023)

[80] B. Schulz, "How reliable are public EV charging stations? Report shows many EV drivers have issues," USA Today, McLean, 2023. Consulté le : 15 déc. 2023. [En ligne]. Disponible : https://www.msn.com/en-us/money/companies/how-reliable-are-public-ev-charging-stations-report-shows-many-ev-drivers-have-issues/ar-AA1cx1iN

[81] National Aeronautics and Space Administration, "NASA exploring space applications of hydrogen and fuel cells," 1er octobre 2012. [En ligne]. Disponible : https://climate.nasa.gov/news/788/nasa-exploring-space-applications-of-hydrogen-and-fuel-cells/ (consulté le : 20 sept. 2023)

[82] M. Aziz, "Liquid Hydrogen: A Review on Liquefaction, Storage, Transportation, and Safety," Energies, vol. 14, no 18, p. 5917, 2021.

[83] A. B. Muna et B. D. Ehrhart, "Identification of Hydrogen Material Risk Research Areas," Sandia National Laboratories, Albuquerque, 2019.

[84] P. Modi et K.-F. Aguey-Zinsou, "Room Temperature Metal Hydrides for Stationary and Heat Storage Applications: A Review," Front. Energy Res., vol. 9, 2021.

[85] M. Kelleher, Y. Oyediran et A. Pollock, "Circularity and Recycling of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles—Standardization and Safety Requirements," Canadian Standards Association, Toronto, 2022. [En ligne]. Disponible : https://www.csagroup.org/article/research/circularity-and-recycling-of-lithium-ion-batteries-for-electric-vehicles-standardization-and-safety-requirements/

[86] J. E. Hyun, "Lithium Ion Battery Life Analysis in Railway Application," The Electrochemical Society - ECS Meeting Abstracts, 2020.

# Annexe A – Questions du sondage et de l'entrevue

## Questions du sondage

1. Les sujets suivants ont été identifiés comme des domaines liés à l'utilisation de l'hydrogène ou de l'électrification par batterie dans un environnement ferroviaire qui pourraient nécessiter des efforts de normalisation supplémentaires. Veuillez évaluer les domaines suivants en fonction de l'incidence que l'élaboration de normes et de codes aurait, selon vous, sur l'avancement et l'adoption de ces technologies au sein du secteur ferroviaire (note comprise entre faible et élevée ; il peut être nécessaire de faire défiler l'écran pour voir toutes les options de notation) :
   - Résistance aux chocs
   - Chocs et vibrations
   - Entretien et inspection
   - Combustible à hydrogène ou wagon auxiliaire à batterie
   - Systèmes programmables
   - Combustible à hydrogène liquide
   - Interfaces : véhicule – infrastructure
   - Diesel – moteurs à hydrogène ou à combustion d'hydrogène
   - Autre (veuillez préciser à la question 3)
2. Classez les domaines suivants par ordre de priorité pour l'élaboration de normes et de codes visant à faire progresser les technologies d'électrification par hydrogène et par batterie dans le secteur ferroviaire ; le plus élevé étant le premier et le plus faible étant le dernier :
   - Résistance aux chocs
   - Chocs et vibrations
   - Entretien et inspection
   - Combustible à hydrogène ou wagon auxiliaire à batterie
   - Systèmes programmables
   - Combustible à hydrogène liquide
   - Interfaces : véhicule – infrastructure
   - Diesel – moteurs à hydrogène ou à combustion d'hydrogène
   - Autre (veuillez préciser à la question 3)

3. Connaissez-vous d'autres lacunes dans les normes et codes existants concernant l'électrification par hydrogène ou par batterie dans les applications ferroviaires qui n'ont pas été incluses dans les questions précédentes ? Si oui, veuillez les décrire ci-dessous.

4. Si vous souhaitez discuter davantage des lacunes ou de la hiérarchisation des normes et des codes relatifs à l'électrification par hydrogène et par batterie dans le secteur ferroviaire avec notre équipe, veuillez indiquer votre nom et vos coordonnées ci-dessous. Vos réponses resteront anonymes dans le rapport final.

**Format de l'entrevue :**

Les questions de l'entrevue ont été adaptées à chaque personne en fonction de leurs domaines d'expertise. En général, des questions d'introduction ont été posées, avec des questions de suivi le cas échéant, et les questions ouvertes ont été privilégiées. Les entrevues se sont déroulées dans un esprit de dialogue.

# Annexe B – Documents et règlements applicables

**Tableau B 1 :** Documents pertinents

| Désignation | Titre | Année de publication | Éditeur | Sujet |
|---|---|---|---|---|
| **Association of American Railroads (AAR)** | | | | |
| AAR S-580 | Locomotive crashworthiness requirements, S-580 | 2020 | AAR | Véhicule |
| AAR S-5506 | Performance requirements for diesel electric locomotive fuel tanks, S-5506 | 2001 | AAR | Véhicule |
| AAR M-1004 | Interoperable fuel tenders for locomotives, M-1004 | 2023 | AAR | Véhicule |
| AAR M-1005 | Interoperable battery tenders for locomotives, M-1005 | 2022 | AAR | Véhicule |
| **American Public Transit Association (APTA)** | | | | |
| APTA PR-CS-S-007-98 | Fuel tank integrity on non passenger carrying locomotives | 2004 | APTA | Véhicule |
| APTA PR-CS-S-034-99 | Design and construction of passenger railroad rolling stock | 2023 | APTA | Véhicule |
| **American Society of Mechanical Engineers (ASME)** | | | | |
| ASME B31.12 | Hydrogen piping and pipelines | 2008 | ASME | Global |
| ASME BPVC | Boiler and pressure vessel code | 2023 | ASME | Global |
| ASME STP-PT-006 | Design guidelines for hydrogen piping and pipelines | 2007 | ASME | Global |
| ASME RT-1 | Safety standard for structural requirements for light rail vehicles and streetcars | 2020 | ASME | Véhicule |
| ASME RT-2 | Safety standard for structural requirements for heavy rail transit vehicles | 2021 | ASME | Véhicule |
| ASME STP/PT-005 | Design factor guidelines for high-pressure composite hydrogen tanks | 2006 | ASME | Véhicule |
| ASME STP/PT-017 | Properties for composite materials in hydrogen science | 2008 | ASME | Véhicule |
| ASME STP/PT-023 | Guidelines for in-service inspection of composite pressure vessels | 2009 | ASME | Véhicule |

| Désignation | Titre | Année de publication | Éditeur | Sujet |
|---|---|---|---|---|
| **American Society for Testing and Materials (ASTM)** | | | | |
| ASTM B577 | Standard test methods for detection of cuprous oxide (hydrogen embrittlement susceptibility) in copper | 2019 | ASTM | Global |
| ASTM E2652 | Standard test method for assessing combustibility of materials using a tube furnace with a cone-shaped airflow stabilizer, at 750°C | 2009 | ASTM | Global |
| ASTM F1459 | Standard test method for determination of the susceptibility of metallic materials to hydrogen gas embrittlement (HGE) | 2006 | ASTM | Global |
| ASTM F1624 | Standard test method for measurement of hydrogen embrittlement threshold in steel by the incremental step loading technique | 2012 | ASTM | Global |
| ASTM F519 | Standard test method for mechanical hydrogen embrittlement evaluation of plating/coating processes and service environments | 2018 | ASTM | Global |
| ASTM G142 | Standard test method for determination of susceptibility of metals to embrittlement in hydrogen containing environments at high pressure, high temperature, or both | 1998 | ASTM | Global |
| ASTM D 7606 | Standard practice for sampling of high pressure hydrogen and related fuel cell feed gases | 2017 | ASTM | Global |
| **Bureau de normalisation du Québec (BNQ)** | | | | |
| CAN/BNQ 1784-000 | Code canadien d'installation de l'hydrogène | 2022 | BNQ | Global |
| **British Standards Institution (BSI)** | | | | |
| EN 17127 | Outdoor hydrogen refuelling points dispensing gaseous hydrogen and incorporating filling protocols | 2020 | BSI | Infrastructure |
| EN 17124 | Hydrogen fuel – Product specification and quality assurance for hydrogen refuelling points dispensing gaseous hydrogen – Proton exchange membrane (PEM) fuel cell applications for vehicles | 2022 | BSI | Global |
| EN 50122-1 | Railway applications. Fixed installations. Electrical safety, earthing and the return circuit Protective provisions against electric shock | 2022 | BSI | Infrastructure |
| EN 50122-2 | Railway applications – Fixed installations – Electrical safety, earthing and the return circuit – Part 2: Provisions against the effects of stray currents caused by DC traction systems | 2023 | BSI | Infrastructure |
| EN 50122-3 | Railway applications. Fixed installations. Electrical safety, earthing and the return circuit Mutual Interaction of AC and DC traction systems | 2022 | BSI | Infrastructure |

| Désignation | Titre | Année de publication | Éditeur | Sujet |
|---|---|---|---|---|
| **Compressed Air and Gas Institute (CAGI)** | | | | |
| CAGI 3075 | B19.1 Safety standards for compressor systems | 2011 | CAGI | Infrastructure |
| **Compressed Gas Association (CGA)** | | | | |
| CGA C-6.4 | Methods for external visual inspection of natural gas vehicle (NGV) and hydrogen gas vehicle (HGV) fuel containers and their installations | 2007 | CGA | Véhicule |
| CGA G-5 | Hydrogen | 2017 | CGA | Global |
| CGA G-5.3 | Commodity specification for hydrogen | 2017 | CGA | Global |
| CGA G-5.4 | Standard for hydrogen piping systems at user locations | 2019 | CGA | Infrastructure |
| CGA G-5.5 | Standard for hydrogen vent systems | 2021 | CGA | Global |
| CGA G-5.6 | Hydrogen pipeline systems | 2005 | CGA | Infrastructure |
| CGA H-14 | HYCO plant gas leak detection and response practices | 2018 | CGA | Infrastructure |
| CGA H-3 | Standard for cryogenic hydrogen storage | 2019 | CGA | Infrastructure |
| CGA H-4 | Terminology associated with hydrogen fuel technologies | 2020 | CGA | Global |
| CGA H-5 | Standard for bulk hydrogen supply systems (an American National Standard) | 2020 | CGA | Infrastructure |
| CGA P-1, CGA P-1-OSHA | Standard for safe handling of compressed gases in containers | 2022 | CGA | Global |
| CGA P-11 | Guideline for metric practice in the compressed gas industry | 2019 | CGA | Global |
| CGA P-12 | Guideline for safe handling of cryogenic and refrigerated liquids | 2023 | CGA | Global |
| CGA P-19 | CGA recommended hazard ratings for compressed gases | 2019 | CGA | Global |
| CGA P-22 | Guideline for the responsible management and disposition of compressed gases and their cylinders | 2021 | CGA | Global |
| CGA P-28 | OSHA Process safety management and EPA risk management plan guidance document for bulk liquid hydrogen supply systems | 2022 | CGA | Infrastructure |
| CGA P-41 | Locating bulk liquid storage systems in courts | 2023 | CGA | Infrastructure |
| CGA P-56 | Cryogenic Vaporization Systems – Prevention of brittle fracture of equipment and piping | 2022 | CGA | Global |
| CGA P-59 | Prevention of excessive pressure during filling of cryogenic vessels | 2015 | CGA | Global |

| Désignation | Titre | Année de publication | Éditeur | Sujet |
|---|---|---|---|---|
| CGA P-6 | Standard density data, atmospheric gases and hydrogen | 2012 | CGA | Global |
| CGA P-60 | Guideline for the use of the north American industrial classification system and the standard industrial classification indices | 2021 | CGA | Global |
| CGA P-68 | Standard for roadside inspections of vehicles transporting class 2 hazardous materials (formerly CGA SB-40) | 2016 | CGA | Véhicule |
| CGA P-69 | Guideline for emergency response to cryogenic liquid releases | 2018 | CGA | Global |
| CGA P-82 | Standard for maintenance of transfer hoses | 2019 | CGA | Global |
| CGA P-88 | Guideline for the maintenance of bulk delivery equipment containing class 2 hazardous materials (formerly SB-41) | 2020 | CGA | Véhicule |
| CGA PS-28 | CGA Position statement on non-ASME certified pressure relief valves used for thermal expansion relief in certain piping systems | 2019 | CGA | Global |
| CGA PS-31 | CGA Position statement on cleanliness for proton exchange membranes hydrogen piping/components | 2007 | CGA | Global |
| CGA PS-33 | CGA Position statement on use of LPG or propane tank as compressed hydrogen storage buffers | 2008 | CGA | Infrastructure |
| CGA PS-43 | CGA Position statement on selection of pressure relief devices for tubes | 2016 | CGA | Global |
| CGA PS-46 | CGA Position statement on roofs over hydrogen storage systems | 2017 | CGA | Global |
| CGA PS-48 | CGA Position statement on clarification of existing hydrogen setback distances and development of new hydrogen setback distances in NFPA 55 | 2016 | CGA | Infrastructure |
| CGA PS-55 | CGA Position statement on use of non-sparking tools | 2019 | CGA | Global |
| CGA PS-69 | CGA Position statement on liquefied hydrogen supply system separation distances | 2022 | CGA | Infrastructure |
| CGA S-1.1 | Pressure relief device standards – Part 1 – Cylinders for Compressed Gases | 2011 | CGA | Global |
| CGA S-1.2 | Pressure relief device standards – Part 2 – Portable containers for compressed gases | 2009 | CGA | Véhicule |
| CGA S-1.3 | Pressure Relief Device Standards – Part 3 – Stationary storage containers for compressed gases | 2020 | CGA | Infrastructure |

| Désignation | Titre | Année de publication | Éditeur | Sujet |
|---|---|---|---|---|
| **Office des normes générales du Canada (ONGC)** | | | | |
| CAN/CGSB-43.147 | Contenants pour le transport des marchandises dangereuses par chemin de fer | 2023 | ONGC | Véhicule |
| CAN/CGSB-43.149 | Contenants d'une tonne pour le transport des marchandises dangereuses | 2023 | ONGC | Global |
| **Association canadienne de normalisation (Groupe CSA)** | | | | |
| ANSI/CAN/CSA/ISO 12617 | Véhicules routiers – Connecteur de remplissage de gaz naturel liquéfié (GNL) – Connecteur à 3,1 MPa | 2015 | CSA | Infrastructure |
| ANSI/CSA CHMC 1 | Test methods for evaluating material compatibility in compressed hydrogen applications – Metals | 2014 | CSA | Global |
| ANSI/CSA CHMC 2 | Test methods for evaluating material compatibility in compressed hydrogen applications – Polymers | 2019 | CSA | Global |
| ANSI/CSA FC 3 | Portable fuel cell power systems | 2004 | CSA | Global |
| ANSI/CSA HGV 4.5 | Priority and sequencing equipment for hydrogen vehicle fueling stations | 2013 | CSA | Infrastructure |
| ANSI/CSA HGV 4.6 | Manually operated valves for use in gaseous hydrogen vehicle fueling stations | 2013 | CSA | Infrastructure |
| CAN/CSA-C22.2 nº 60079-0 | Atmosphères explosives – Partie 0 : Matériel – Exigences générales | 2015 | CSA | Global |
| CAN/CSA-C22.2 nº 60079-7 | Atmosphères explosives – Partie 7 : Protection du matériel par sécurité augmentée « e » | 2016 | CSA | Global |
| CAN/CSA-C22.2 nº 60079-11 | Atmosphères explosives – Partie 11 : Protection de l'équipement par sécurité intrinsèque « i » | 2014 | CSA | Global |
| CAN/CSA-C22.2 nº 60079-15 | Atmosphères explosives – Partie 15 : Protection du matériel par mode de protection « n » | 2016 | CSA | Global |
| CSA 60079-40 | Explosive Atmospheres – Part 40: Requirements for process sealing between flammable process fluids and electrical systems | 2020 | CSA | Global |
| CSA B51 | Code sur les chaudières, les appareils et les tuyauteries sous pression | 2019 | CSA | Global |
| CSA B72 | Code d'installation des paratonnerres | 2020 | CSA | Global |
| CSA B108.1 | Compressed natural gas refuelling stations installation code | 2021 | CSA | Infrastructure |
| CSA B108.2 | Liquefied natural gas refuelling stations installation code | 2021 | CSA | Infrastructure |

| Désignation | Titre | Année de publication | Éditeur | Sujet |
|---|---|---|---|---|
| CSA B109.1 | Code d'installation du gaz naturel comprimé pour les véhicules | 2021 | CSA | Véhicule |
| CSA B109.2 | Code d'installation du gaz naturel liquéfié pour les véhicules | 2021 | CSA | Véhicule |
| CSA B401.1 | Code sur les établissements d'entretien de véhicules au gaz naturel (VGN) | 2021 | CSA | Infrastructure |
| CSA B401.2 | Code sur les établissements d'entretien de véhicules au propane | 2021 | CSA | Infrastructure |
| CSA C22.1 | Code canadien de l'électricité, Première partie (vingt-cinquième édition), Norme de sécurité relative aux installations électriques | 2021 | CSA | Global |
| CSA C22.2 nº 0.4 | Bonding of electrical equipment | 2017 | CSA | Global |
| CSA C22.2 nº 0.17 | Évaluation des propriétés des matières polymères | 2022 | CSA | Global |
| CSA C22.2 nº 14 | Appareillage industriel de commande | 2018 | CSA | Global |
| CSA C22.2 nº 94.1 | Enclosures for electrical equipment, non-environmental considerations (Tri-national standard with NMX-J-235/1-ANCE-2015 and UL 50) | 2015 | CSA | Global |
| CSA C22.2 nº 94.2 | Enclosures for electrical equipment, environmental considerations (Trinational standard with NMX-J-235/2-ANCE-2020 and UL 50E) | 2020 | CSA | Global |
| CSA C22.2 nº 107.1 | Power conversion equipment | 2016 | CSA | Global |
| CSA C22.2 nº 139 | Electrically operated valves | 2019 | CSA | Global |
| CSA C22.2 nº 286 | Panneaux et ensembles industriels de commande | 2017 | CSA | Global |
| CSA C22.2 nº 301 | Industrial electrical machinery | 2016 | CSA | Global |
| CSA C22.2 nº 2556 | Wire and cable test methods (Trinational standard with NMX-J-556-ANCE-2021 and UL 2556) | 2021 | CSA | Global |
| CSA C22.2 nº 60079-1 | Atmosphères explosives – Partie 1 : Protection du matériel par enveloppes antidéflagrantes « d » | 2016 | CSA | Global |
| CSA C22.2 nº 60079-2 | Atmosphères explosives – Partie 2 : Protection du matériel par enveloppe à surpression interne « p » | 2016 | CSA | Global |
| CSA C22.2 nº 60079-5 | Atmosphères explosives – Partie 5 : Protection du matériel par remplissage pulvérulent « q » | 2016 | CSA | Global |
| CSA C22.2 nº 60079-6 | Atmosphères explosives – Partie 6 : Protection du matériel par immersion dans le liquide « o » | 2017 | CSA | Global |
| CSA C22.2 nº 60079-13 | Atmosphères explosives – Partie 13 : Protection du matériel par salle à surpression interne « p » et salle à ventilation artificielle « v » | 2019 | CSA | Global |

| Désignation | Titre | Année de publication | Éditeur | Sujet |
|---|---|---|---|---|
| CSA C22.2 nº 60079-25 | Atmosphères explosives – Partie 25 : Systèmes électriques de sécurité intrinsèque | 2022 | CSA | Global |
| CSA C22.2 nº 60079-29-1 | Atmosphères explosives – Partie 29-1 : Détecteurs de gaz – Exigences d'aptitude à la fonction des détecteurs de gaz inflammables | 2017 | CSA | Global |
| CSA C22.2 nº 60079-29-4 | Atmosphères explosives – Partie 29-4 : Détecteurs de gaz – Exigences d'aptitude à la fonction des détecteurs de gaz inflammables à chemin ouvert | 2016 | CSA | Global |
| CSA C22.2 nº 60079-46 | Atmosphères explosives – Partie 46 : Assemblages d'appareils | 2019 | CSA | Global |
| CSA C22.2 nº 60079-47 | Explosive atmospheres – Part 47: Equipment protection by 2-wire intrinsically safe Ethernet concept (2-WISE) | 2022 | CSA | Global |
| CSA C22.2 nº 60529 | Degrés de protection procurés par les enveloppes (Code IP) | 2016 | CSA | Global |
| CSA C22.2 nº 62282-2 | Technologies des piles à combustible – Partie 2 : Modules à piles à combustible | 2018 | CSA | Global |
| CSA C61000-3-11 | Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 3-11 : Limitation des variations de tension, des fluctuations de tension et du papillotement dans les réseaux publics d'alimentation basse tension – Équipements ayant un courant assigné ≤ 75 A et soumis à un raccordement conditionnel | 2021 | CSA | Global |
| CSA C61000-4-1 | Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-1: Testing and measurement techniques – Overview of the IEC 61000-4 series | 2019 | CSA | Global |
| CSA E60730-2-14 | Dispositifs de commande électrique automatiques – Partie 2-14 : Exigences particulières pour les actionneurs électriques | 2020 | CSA | Global |
| CSA E60730-2-15 | Dispositifs de commande électrique automatiques à usage domestique et analogue – Partie 2-15 : Exigences particulières pour les dispositifs de commande électrique automatiques détecteurs de débit d'air, de débit d'eau et de niveau d'eau | 2014 | CSA | Global |
| CSA E61959 | Accumulateurs alcalins et autres accumulateurs à électrolyte non acide – Essais mécaniques pour accumulateurs portables étanches | 2014 | CSA | Global |
| CSA E62660-1 | Éléments d'accumulateurs lithium-ion pour la propulsion des véhicules routiers électriques – Partie 1 : Essais de performance | 2021 | CSA | Véhicule |
| CSA E62660-2 | Éléments d'accumulateurs lithium-ion pour la propulsion des véhicules routiers électriques – Partie 2 : Essais de fiabilité et de traitement abusif | 2021 | CSA | Véhicule |

| Désignation | Titre | Année de publication | Éditeur | Sujet |
|---|---|---|---|---|
| CSA HPIT 1 | Compressed hydrogen powered industrial truck on-board fuel storage and handling components | 2015 | CSA | Véhicule |
| CSA HPIT 2 | Dispensing systems and components for fueling hydrogen powered industrial trucks | 2017 | CSA | Véhicule |
| CSA ISO 3100 | Management du risque – Lignes directrices | 2018 | CSA | Global |
| CSA SPE-2.1.3 | Best practices for defueling, decommissioning, and disposal of compressed hydrogen gas vehicle fuel containers | 2020 | CSA | Véhicule |
| CSA SPE-343 | Electric vehicle energy management systems | 2021 | CSA | Véhicule |
| CSA TS-602 | Railway applications – Rolling stock – Onboard lithium-ion traction batteries | 2023 | CSA | Véhicule |
| CSA Z246.2 | Préparation et intervention d'urgence pour les installations liées à l'industrie du pétrole et du gaz naturel | 2018 | CSA | Global |
| CSA Z276 | Gaz naturel liquéfié (GNL) : production, stockage et manutention | 2022 | CSA | Infrastructure |
| CSA Z767 | Gestion de la sécurité opérationnelle | 2017 | CSA | Global |
| CSA/ANSI CHMC 2 | Test methods for evaluating material compatibility in compressed hydrogen applications – Polymers | 2019 | CSA | Global |
| CSA/ANSI B22734 | Hydrogen generators using water electrolysis – Industrial, commercial, and residential applications | 2023 | CSA | Infrastructure |
| CSA/ANSI FC 1/CSA C22.2 nº 62282-3-100 | Technologies des piles à combustible – Partie 3-100 : Systèmes à piles à combustible stationnaires – Sécurité | 2021 | CSA | Infrastructure |
| CSA/ANSI FC 5 | Hydrogen generators using fuel processing technologies – Part 1: Safety | 2021 | CSA | Infrastructure |
| CSA/ANSI HGV 2 | Compressed hydrogen gas vehicle fuel containers | 2021 | CSA | Véhicule |
| CSA/ANSI HGV 3.1 | Fuel system components for compressed hydrogen gas powered vehicles | 2022 | CSA | Véhicule |
| CSA/ANSI HGV 4.1 | Hydrogen-dispensing systems | 2020 | CSA | Infrastructure |
| CSA/ANSI HGV 4.2 | Hoses for dispensing compressed gaseous hydrogen | 2022 | CSA | Infrastructure |
| CSA/ANSI HGV 4.3 | Test methods for hydrogen fueling parameter evaluation | 2022 | CSA | Global |
| CSA/ANSI HGV 4.4 | Gaseous hydrogen – Fuelling stations – Valves | 2021 | CSA | Infrastructure |
| CSA/ANSI HGV 4.9 | Hydrogen fueling stations | 2020 | CSA | Infrastructure |
| CSA/ANSI HGV 4.10 | Standard for fittings for use in compressed gaseous hydrogen fueling stations | 2021 | CSA | Infrastructure |
| CSA/ANSI HPRD 1 | Thermally activated pressure relief devices for compressed hydrogen vehicle (HGV) fuel containers | 2021 | CSA | Véhicule |

| Désignation | Titre | Année de publication | Éditeur | Sujet |
|---|---|---|---|---|
| CSA/ANSI LNG 3.1 | Road vehicles – Liquefied natural gas (LNG) fuel system components – Part 1: General requirements and definitions | 2022 | CSA | Véhicule |
| CSA/ANSI LNG 3.2 | Road vehicles – Liquefied natural gas (LNG) fuel system components – Part 2: Performance and general test methods | 2022 | CSA | Véhicule |
| CSA/ANSI LNG 3.3 | Road vehicles – Liquefied natural gas (LNG) fuel system components – Part 3: Check valve | 2022 | CSA | Véhicule |
| CSA/ANSI LNG 3.4 | Liquefied natural gas (LNG) fuel system components – Part 4: Manual valve | 2022 | CSA | Véhicule |
| CSA/ANSI LNG 3.5 | Road vehicles – Liquefied natural gas (LNG) fuel system components – Part 5: Tank pressure gauge | 2022 | CSA | Véhicule |
| CSA/ANSI LNG 3.7 | Road vehicles – Liquefied natural gas (LNG) fuel system components – Part 7: Pressure relief valve | 2022 | CSA | Véhicule |
| CSA/ANSI LNG 3.8 | Road vehicles – Liquefied natural gas (LNG) fuel system components – Part 8: Excess flow valve | 2022 | CSA | Véhicule |
| CSA/ANSI LNG 3.9 | Road vehicles – Liquefied natural gas (LNG) fuel system components – Part 9: Gas-tight housing and ventilation hose | 2022 | CSA | Véhicule |
| CSA/ANSI LNG 3.10 | Road vehicles – Liquefied natural gas (LNG) fuel system components – Part 10: Rigid fuel line in stainless steel | 2022 | CSA | Véhicule |
| CSA/ANSI LNG 3.11 | Road vehicles – Liquefied natural gas (LNG) fuel system components – Part 11: Fittings | 2022 | CSA | Véhicule |
| CSA/ANSI LNG 3.12 | Road vehicles – Liquefied natural gas (LNG) fuel system components – Part 12: Rigid fuel line in copper and its alloys | 2022 | CSA | Véhicule |
| CSA/ANSI LNG 3.13 | Road vehicles – Liquefied natural gas (LNG) fuel system components – Part 13: Tank pressure control regulator | 2022 | CSA | Véhicule |
| CSA/ANSI LNG 3.14 | Road vehicles – Liquefied natural gas (LNG) fuel system components – Part 14: Differential pressure fuel content gauge | 2022 | CSA | Véhicule |
| CSA/ANSI LNG 3.15 | Road vehicles – Liquefied natural gas (LNG) fuel system components – Part 15: Capacitance fuel content gauge | 2022 | CSA | Véhicule |
| CSA/ANSI LNG 3.16 | Road vehicles – Liquefied natural gas (LNG) fuel system components – Part 16: Heat exchanger–vaporizer | 2022 | CSA | Véhicule |
| CSA/ANSI LNG 3.18 | Road vehicles – Liquefied natural gas (LNG) fuel system components – Part 18: Gas temperature sensor | 2022 | CSA | Véhicule |
| CSA/ANSI LNG 3.19 | Road vehicles – Liquefied natural gas (LNG) fuel system components – Part 19: Automatic valve | 2022 | CSA | Véhicule |
| CSA/ANSI LNG 3.20 | Road vehicles – Liquefied natural gas (LNG) fuel system components – Part 20: Flexible fuel or vent lines | 2020 | CSA | Véhicule |

| Désignation | Titre | Année de publication | Éditeur | Sujet |
|---|---|---|---|---|
| CSA/ANSI LNG 4.1 | Liquified natural gas (LNG) dispensing systems for natural gas vehicles (NGV) | 2018 | CSA | Infrastructure |
| CSA/ANSI NGV 2 | Compressed natural gas vehicle fuel containers | 2019 | CSA | Véhicule |
| CSA/ANSI NGV 4.1 | Natural gas vehicle (NGV) dispensing systems | 2018 | CSA | Infrastructure |
| CSA/ANSI NGV 4.3 | Temperature compensation for compressed natural gas vehicle fuelling | 2022 | CSA | Global |
| CSA/ANSI NGV 4.8 | Natural gas vehicle fuelling station compressor packages | 2021 | CSA | Infrastructure |
| CSA/ANSI NGV 6.1 | Système de stockage et de distribution de gaz naturel comprimé (GNC) pour véhicules routiers | 2021 | CSA | Véhicule |
| CSA/ANSI PRD 1 | Pressure relief devices for natural gas vehicle (NGV) fuel containers | 2020 | CSA | Véhicule |
| CSA/IEC TS 61000-3-5 | Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 3-5 : Limites – Limitation des fluctuations de tension et du flicker dans les réseaux basse tension pour les équipements ayant un courant appelé supérieur à 75 A | 2021 | CSA | Global |
| **Normes européennes/Euronorm (EN)** | | | | |
| EN 17533 | Gaseous hydrogen – Cylinders and tubes for stationary storage | 2020 | EN | Infrastructure |
| EN 45545 | Fire Protection on Railway Vehicles | 2013 | EN | Véhicule |
| EN 50121-3-2 | Railway applications – Electromagnetic compatibility – Part 3-2: Rolling stock - Apparatus | 2019 | EN | Véhicule |
| EN 50153 | Railway applications – Rolling stock – Protective provisions relating to electrical hazards | 2020 | EN | Véhicule |
| EN 50343 | Railway applications – Rolling stock – Rules for installation of cabling | 2018 | EN | Véhicule |
| **Commission électrotechnique internationale (CEI)** | | | | |
| IEC 60034-1 | Machines électriques tournantes – Partie 1 : Caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement | 2017 | CEI | Global |
| IEC 60079-10-1 | Atmosphères explosives – Partie 10-1 : Classification des emplacements – Atmosphères explosives gazeuses | 2020 | CEI | Global |
| IEC 60079-14 | Atmosphères explosives – Partie 14 : Conception, sélection et construction des installations électriques | 2013 | CEI | Global |
| IEC 60079-18 | Atmosphères explosives – Partie 18 : Protection du matériel par encapsulage « m » | 2014 | CEI | Global |
| IEC 60079-26 | Atmosphères explosives – Partie 26 : Appareil avec éléments de séparation ou niveaux de protection combinés | 2021 | CEI | Global |

| Désignation | Titre | Année de publication | Éditeur | Sujet |
|---|---|---|---|---|
| IEC TS 60079-32-1 | Atmosphères explosives – Partie 32-1 : Dangers électrostatiques – Recommandations | 2013 | CEI | Global |
| IEC 60204-1 | Sécurité des machines – Équipement électrique des machines – Partie 1 : Exigences générales | 2016 | CEI | Global |
| IEC 60695-11-10 | Essais relatifs aux risques du feu – Partie 11-10 : Flammes d'essai – Méthodes d'essai horizontal et vertical à la flamme de 50 W | 2013 | CEI | Global |
| IEC 60730-1 | Dispositifs de commande électrique automatiques – Partie 1 : Exigences générales | 2013 | CEI | Global |
| IEC 60730-2-6 | Dispositifs de commande électrique automatiques – Partie 2-6 : Exigences particulières pour les dispositifs de commande électrique automatiques sensibles à la pression y compris les exigences mécaniques | 2015 | CEI | Global |
| IEC 60730-2-9 | Dispositifs de commande électrique automatiques – Partie 2-9 : Exigences particulières pour les dispositifs de commande thermosensibles | 2015 | CEI | Global |
| IEC 60812 | Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE et AMDEC) | 2018 | CEI | Global |
| IEC 61000-3-11 | Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 3-11 : Limites – Limitation des variations de tension, des fluctuations de tension et du papillotement dans les réseaux publics d'alimentation basse tension – Équipements ayant un courant assigné ≤ 75 A et soumis à un raccordement conditionnel | 2017 | CEI | Global |
| IEC 61000-3-2 | Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 3-2 : Limites – Limites pour les émissions de courant harmonique (courant appelé par les appareils ≤ 16 A par phase) | 2018 | CEI | Global |
| IEC 61000-3-3 | Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 3-3 : Limites – Limitation des variations de tension, des fluctuations de tension et du papillotement dans les réseaux publics d'alimentation basse tension, pour les matériels ayant un courant assigné ≤ 16 A par phase et non soumis à un raccordement conditionnel | 2013 | CEI | Global |
| IEC TS 61000-3-4 | Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 3-4 : Limites – Limitation des émissions de courants harmoniques dans les réseaux basse tension pour les matériels ayant un courant assigné supérieur à 16 A | 1998 | CEI | Global |
| IEC 61000-6-1 | Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 6-1 : Normes génériques – Norme d'immunité pour les environnements résidentiels, commerciaux et de l'industrie légère | 2016 | CEI | Global |
| IEC 61000-6-2 | Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 6-2 : Normes génériques – Immunité pour les environnements industriels | 2016 | CEI | Global |
| IEC 61000-6-4 | Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 6-4 : Normes génériques – Norme sur l'émission pour les environnements industriels | 2018 | CEI | Global |

| Désignation | Titre | Année de publication | Éditeur | Sujet |
|---|---|---|---|---|
| IEC 61010-1 | Règles de sécurité pour appareils électriques de mesurage, de régulation et de laboratoire – Partie 1 : Exigences générales | 2010 | CEI | Global |
| IEC 61010-2-202 | Exigences de sécurité pour appareils électriques de mesurage, de régulation et de laboratoire – Partie 2-202 : Exigences particulières pour les actionneurs à vanne à commande électrique | 2020 | CEI | Global |
| IEC 61025 | Analyse par arbre de panne (AAP) | 2006 | CEI | Global |
| IEC 61373 | Applications ferroviaires – Matériel roulant – Essais de chocs et vibrations | 2010 | CEI | Véhicule |
| IEC 61508-1 | Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques/électroniques/électroniques programmables relatifs à la sécurité – Partie 1 : Exigences générales | 2010 | CEI | Global |
| IEC 61508-2 | Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques/électroniques/électroniques programmables relatifs à la sécurité – Partie 2 : Exigences pour les systèmes électriques/électroniques/électroniques programmables relatifs à la sécurité | 2010 | CEI | Global |
| IEC 61508-3 | Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques/électroniques/électroniques programmables relatifs à la sécurité – Partie 3 : Exigences concernant les logiciels | 2010 | CEI | Global |
| IEC 61508-4 | Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques/électroniques/électroniques programmables relatifs à la sécurité – Partie 4 : Définitions et abréviations | 2010 | CEI | Global |
| IEC 61508-5 | Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques/électroniques/électroniques programmables relatifs à la sécurité – Partie 5 : Exemples de méthodes pour la détermination des niveaux d'intégrité de sécurité | 2010 | CEI | Global |
| IEC 61508-6 | Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques/électroniques/électroniques programmables relatifs à la sécurité – Partie 6 : Lignes directrices pour l'application de la IEC 61508-2 et de la IEC 61508-3 | 2010 | CEI | Global |
| IEC 61508-7 | Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques/électroniques/électroniques programmables relatifs à la sécurité – Partie 7 : Présentation de techniques et mesures | 2010 | CEI | Global |
| IEC 61810-1 | Relais électromécaniques élémentaires – Partie 1 : Exigences générales et de sécurité | 2015 | CEI | Global |
| IEC 61851-1 | Système de charge conductive pour véhicules électriques – Partie 1 : Exigences générales | 2017 | CEI | Infrastructure |
| IEC 61882 | Études de danger et d'exploitabilité (études HAZOP) – Guide d'application | 2016 | CEI | Global |
| IEC 61980-1 | Systèmes de transfert de puissance sans fil (WPT) pour véhicules électriques – Partie 1 : Exigences générales | 2020 | CEI | Infrastructure |

| Désignation | Titre | Année de publication | Éditeur | Sujet |
|---|---|---|---|---|
| IEC 61980-2 | Systèmes de transfert de puissance sans fil (WPT) pour véhicules électriques – Partie 2 : Exigences spécifiques pour la communication et les activités des systèmes MF-WPT | 2023 | CEI | Infrastructure |
| IEC 61980-3 | Systèmes de transfert de puissance sans fil (WPT) pour véhicules électriques – Partie 3 : Exigences spécifiques pour les systèmes de transfert de puissance sans fil par champ magnétique | 2022 | CEI | Infrastructure |
| IEC 62061 | Sécurité des machines – Sécurité fonctionnelle des systèmes de commande relatifs à la sécurité | 2005 | CEI | Global |
| IEC 62196-1 | Fiches, socles de prise de courant, prises mobiles de véhicule et socles de connecteurs de véhicule – Charge conductive des véhicules électriques – Partie 1 : Exigences générales | 2022 | CEI | Véhicule |
| IEC 62282-4-101 | Technologies des piles à combustible – Partie 4-101 : Systèmes à pile à combustible pour chariots de manutention électriques – Sécurité | 2022 | CEI | Véhicule |
| IEC 62282-4-102 | Technologies des piles à combustible – Partie 4-102 : Systèmes à piles à combustible pour chariots de manutention électriques – Méthodes d'essai des performances | 2022 | CEI | Véhicule |
| IEC 62282-5-100 | Technologies des piles à combustible – Partie 5-100 : Systèmes à piles à combustible portables – Sécurité | 2018 | CEI | Véhicule |
| IEC 62485-3 | Exigences de sécurité pour les batteries d'accumulateurs et les installations de batteries – Partie 3 : Batteries de traction | 2014 | CEI | Véhicule |
| IEC 62619 | Accumulateurs alcalins et autres accumulateurs à électrolyte non acide – Exigences de sécurité pour les accumulateurs au lithium pour utilisation dans des applications industrielles | 2022 | CEI | Global |
| IEC 62620 | Accumulateurs alcalins et autres accumulateurs à électrolyte non acide – Éléments et batteries d'accumulateurs au lithium pour utilisation dans les applications industrielles | 2014 | CEI | Global |
| IEC 62660-1 | Éléments d'accumulateurs lithium-ion pour la propulsion des véhicules routiers électriques – Partie 1 : Essais de performance | 2018 | CEI | Véhicule |
| IEC 62660-3 | Éléments d'accumulateurs lithium-ion pour la propulsion des véhicules routiers électriques – Partie 3 : Exigences de sécurité | 2022 | CEI | Véhicule |
| IEC 62864-1 | Applications ferroviaires – Matériel roulant – Alimentation équipée d'un système embarqué de stockage de l'énergie – Partie 1 : Système hybride série | 2016 | CEI | Véhicule |
| IEC 62928 | Applications ferroviaires – Matériel roulant – Batteries d'accumulateurs de traction embarquées au lithium-ion | 2017 | CEI | Véhicule |
| IEC 63341-1 | Railway applications – Rolling stock – Fuel cell systems for propulsion – Part 1: Fuel cell power system | Ébauche | CEI | Véhicule |

| Désignation | Titre | Année de publication | Éditeur | Sujet |
|---|---|---|---|---|
| **Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)** | | | | |
| IEEE 16 | IEEE Standard for Electrical and Electronic Control Apparatus on Rail Vehicles | 2020 | IEEE | Véhicule |
| **Organisation internationale de normalisation (ISO)** | | | | |
| ISO 1182 | Essais de réaction au feu de produits – Essai d'incombustibilité | 2020 | ISO | Global |
| ISO 4126-1 | Dispositifs de sécurité pour protection contre les pressions excessives – Partie 1 : Soupapes de sûreté | 2013 | ISO | Global |
| ISO 4126-5 | Dispositifs de sécurité pour protection contre les pressions excessives – Partie 5 : Dispositifs de sécurité asservis (CSPRS) | 2013 | ISO | Global |
| ISO 4414 | Transmissions pneumatiques – Règles générales et exigences de sécurité pour les systèmes et leurs composants | 2010 | ISO | Global |
| ISO 6469-1 | Véhicules routiers électriques – Spécifications de sécurité – Partie 1 : Système de stockage d'énergie rechargeable (RESS) | 2019 | ISO | Véhicule |
| ISO 6469-2 | Véhicules routiers électriques – Spécifications de sécurité – Partie 2 : Sécurité fonctionnelle du véhicule | 2022 | ISO | Véhicule |
| ISO 6469-3 | Véhicules routiers électriques – Spécifications de sécurité – Partie 3 : Sécurité électrique | 2021 | ISO | Véhicule |
| ISO 10439-1 | Industries du pétrole, de la pétrochimie et du gaz naturel – Compresseurs axiaux et centrifuges et compresseurs-détenteurs – Partie 1 : Exigences générales | 2015 | ISO | Infrastructure |
| ISO 10439-2 | Industries du pétrole, de la pétrochimie et du gaz naturel – Compresseurs axiaux et centrifuges et compresseurs-détenteurs – Partie 2 : Compresseurs centrifuges et axiaux sans multiplicateur intégré | 2015 | ISO | Infrastructure |
| ISO 10439-3 | Industries du pétrole, de la pétrochimie et du gaz naturel – Compresseurs axiaux et centrifuges et compresseurs-détenteurs – Partie 3 : Compresseurs centrifuges et axiaux à multiplicateur intégré | 2015 | ISO | Infrastructure |
| ISO 10439-4 | Industries du pétrole, de la pétrochimie et du gaz naturel – Compresseurs axiaux et centrifuges et compresseurs-détenteurs – Partie 4 : Compresseurs-détenteurs | 2015 | ISO | Infrastructure |
| ISO 10440-1 | Industries du pétrole, pétrochimique et du gaz naturel – Compresseurs volumétriques de type rotatif – Partie 1 : Compresseurs de procédé | 2007 | ISO | Infrastructure |
| ISO 10440-2 | Industries du pétrole et du gaz naturel – Compresseurs volumétriques de type rotatif – Partie 2 : Compresseurs à air assemblé (sans huile) | 2001 | ISO | Infrastructure |
| ISO 10442 | Industries du pétrole, de la chimie et du gaz naturel – Compresseurs d'air centrifuges assemblés à multiplicateur intégré | 2002 | ISO | Infrastructure |

| Désignation | Titre | Année de publication | Éditeur | Sujet |
|---|---|---|---|---|
| ISO 11114-1 | Bouteilles à gaz – Compatibilité des matériaux des bouteilles et des robinets avec les contenus gazeux – Partie 1 : Matériaux métalliques | 2020 | ISO | Véhicule |
| ISO 11114-2 | Bouteilles à gaz – Compatibilité des matériaux des bouteilles et des robinets avec les contenus gazeux – Partie 2 : Matériaux non métalliques | 2021 | ISO | Véhicule |
| ISO 11114-3 | Bouteilles à gaz – Compatibilité des matériaux de bouteilles et de robinets avec les contenus gazeux – Partie 3 : Essai d'auto-inflammation des matériaux non métalliques sous atmosphère d'oxygène | 2010 | ISO | Véhicule |
| ISO 11114-4 | Bouteilles à gaz transportables – Compatibilité des matériaux et des robinets avec les contenus gazeux – Partie 4 : Méthodes d'essai pour le choix des aciers résistants à la fragilisation par l'hydrogène | 2017 | ISO | Global |
| ISO 11363-1 | Bouteilles à gaz – Filetages coniques 17E et 25E pour le raccordement des robinets sur les bouteilles à gaz – Partie 1 : Spécifications | 2018 | ISO | Global |
| ISO 11363-2 | Bouteilles à gaz – Filetages coniques 17E et 25E pour le raccordement des robinets sur les bouteilles à gaz – Partie 2 : Calibres de contrôle | 2017 | ISO | Global |
| ISO 11439 | Bouteilles à gaz – Bouteilles haute pression pour le stockage de gaz naturel utilisé comme carburant à bord des véhicules automobiles – Amendement 1 (publié en 2021) | 2013 | ISO | Véhicule |
| ISO 12100 | Sécurité des machines – Principes généraux de conception – Appréciation du risque et réduction du risque | 2010 | ISO | Global |
| ISO 12405-4 | Véhicules routiers à propulsion électrique – Spécifications d'essai pour packs et systèmes de batterie de traction aux ions lithium – Partie 4 : Essais de performance | 2018 | ISO | Véhicule |
| ISO 13631 | Industries du pétrole et du gaz naturel – Unités de compresseurs alternatifs à gaz | 2002 | ISO | Infrastructure |
| ISO 13707 | Industries du pétrole et du gaz naturel – Compresseurs alternatifs | 2000 | ISO | Infrastructure |
| ISO 13849-1 | Sécurité des machines – Parties des systèmes de commande relatives à la sécurité – Partie 1 : Principes généraux de conception | 2023 | ISO | Global |
| ISO 13849-2 | Sécurité des machines – Parties des systèmes de commande relatives à la sécurité – Partie 2 : Validation | 2012 | ISO | Global |
| ISO 13850 | Sécurité des machines – Fonction d'arrêt d'urgence – Principes de conception | 2015 | ISO | Global |
| ISO 13984 | Hydrogène liquide – Interface des systèmes de remplissage pour véhicules terrestres | 1999 | ISO | Infrastructure |
| ISO 13985 | Hydrogène liquide – Réservoirs de carburant pour véhicules terrestres | 2006 | ISO | Véhicule |

| Désignation | Titre | Année de publication | Éditeur | Sujet |
|---|---|---|---|---|
| ISO 14687 | Qualité du carburant hydrogène – Spécification de produit | 2019 | ISO | Global |
| ISO TR-15916 | Considérations fondamentales pour la sécurité des systèmes à l'hydrogène | 2015 | ISO | Global |
| ISO 16110-1 | Générateurs d'hydrogène faisant appel aux technologies du traitement du carburant – Partie 1 : Sécurité | 2007 | ISO | Infrastructure |
| ISO 16110-2 | Générateurs d'hydrogène faisant appel aux technologies du traitement du carburant – Partie 2 : Méthodes d'essai de rendement | 2010 | ISO | Infrastructure |
| ISO 16111 | Appareils de stockage de gaz transportables – Hydrogène absorbé dans un hydrure métallique réversible | 2018 | ISO | Véhicule |
| ISO 16528-1 | Chaudières et récipients sous pression – Partie 1 : Exigences de performance | 2007 | ISO | Global |
| ISO 17268 | Dispositifs de raccordement pour le ravitaillement des véhicules terrestres en hydrogène gazeux | 2020 | ISO | Infrastructure |
| ISO 19078 | Bouteilles à gaz – Inspection de l'installation des bouteilles, et requalification des bouteilles haute pression pour le stockage du gaz naturel, utilisé comme carburant, à bord des véhicules automobiles | 2013 | ISO | Véhicule |
| ISO 19880-1 | Carburant d'hydrogène gazeux – Stations-service – Partie 1 : Exigences générales | 2020 | ISO | Infrastructure |
| ISO 19880-3 | Carburant d'hydrogène gazeux – Stations-service – Partie 3 : Vannes | 2018 | ISO | Infrastructure |
| ISO 19880-5 | Carburant d'hydrogène gazeux – Stations-service – Partie 5 : Flexibles et assemblages flexibles pour distributeurs | 2019 | ISO | Infrastructure |
| ISO 19880-8 | Hydrogène gazeux – Stations de remplissage – Partie 8 : Contrôle qualité du carburant – Amendement 1 (publié en 2021) | 2019 | ISO | Infrastructure |
| ISO 19881 | Hydrogène gazeux – Réservoirs de carburant pour véhicules terrestres | 2018 | ISO | Véhicule |
| ISO 19882 | Hydrogène gazeux – Dispositifs limiteurs de pression thermiquement activés pour les conteneurs de carburant de véhicules à hydrogène comprimé | 2018 | ISO | Véhicule |
| ISO 19887 | Gaseous hydrogen – Fuel system components for hydrogen fuelled vehicles | En cours d'élaboration | ISO | Véhicule |
| ISO 21010 | Récipients cryogéniques – Compatibilité gaz/matériaux | 2017 | ISO | Global |
| ISO 21014 | Récipients cryogéniques – Performances d'isolation cryogénique | 2019 | ISO | Global |
| ISO 21028-1 | Récipients cryogéniques – Exigences de ténacité pour les matériaux à température cryogénique – Partie 1 : Températures inférieures à -80 degrés C | 2016 | ISO | Global |

| Désignation | Titre | Année de publication | Éditeur | Sujet |
|---|---|---|---|---|
| ISO 21087 | Analyse des gaz – Méthodes analytiques pour carburant hydrogène – Applications utilisant des piles à combustible à membrane échangeuse de protons (MEP) pour véhicules routiers | 2019 | ISO | Global |
| ISO 23208 | Récipients cryogéniques – Propreté en service cryogénique | 2017 | ISO | Global |
| ISO 23273-1 | Véhicules routiers alimentés par pile à combustible – Spécifications de sécurité – Partie 1 : Sécurité fonctionnelle du véhicule | 2013 | ISO | Véhicule |
| 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 | 2013 | ISO | Véhicule |
| ISO 24490 | Récipients cryogéniques – Pompes pour service cryogénique | 2016 | ISO | Infrastructure |
| ISO 26142 | Détecteurs d'hydrogène – Applications fixes | 2010 | ISO | Infrastructure |
| **Japanese Standards Association (JSA)** | | | | |
| JSA JIS H 7003 | Glossary of terms used in hydrogen absorbing alloys | 2021 | JSA | Global |
| JSA JIS H 7201 | Method for measurement of pressure-composition-temperature (PCT) relations of hydrogen absorbing alloys | 2011 | JSA | Global |
| JSA JIS H 7202 | Method for measurement of hydrogen absorption/desorption reaction rate of hydrogen absorbing alloys | 2022 | JSA | Global |
| JSA JIS H 7203 | Method for measurement of hydrogen absorption/desorption cycle characteristic of hydrogen absorbing alloys | 2021 | JSA | Global |
| **National Association of Corrosion Engineers (NACE)** | | | | |
| ANSI/NACE TM0284 | Evaluation of pipeline and pressure vessel steels for resistance to hydrogen-induced cracking | 2016 | NACE | Global |
| **National Fire Protection Association (NFPA)** | | | | |
| NFPA 2 | Hydrogen technologies code | 2023 | NFPA | Global |
| NFPA 52 | Vehicular natural gas fuel systems code | 2023 | NFPA | Global |
| NFPA 55 | Compressed gases and cryogenic fluids code | 2023 | NFPA | Global |
| NFPA 68 | Standard on explosion protection by deflagration venting | 2023 | NFPA | Global |
| NFPA 69 | Standard on explosion prevention systems | 2019 | NFPA | Global |
| NFPA 70 | National electrical code | 2005 | NFPA | Global |

| Désignation | Titre | Année de publication | Éditeur | Sujet |
|---|---|---|---|---|
| NFPA 77 | Recommended practice on static electricity | 2024 | NFPA | Global |
| NFPA 80A | Recommended practice for protection of buildings from exterior fire exposures | 2022 | NFPA | Infrastructure |
| NFPA 91 | Standard for exhaust systems for air conveying of vapors, gases, mists, and particulate solids | 2020 | NFPA | Global |
| NFPA 130 | Standard for fixed guideway transit and passenger rail systems | 2023 | NFPA | Global |
| NFPA 274 | Standard test method to evaluate fire performance characteristics of pipe insulation | 2023 | NFPA | Global |
| NFPA 329 | Recommended practice for handling releases of flammable and combustible liquids and gases | 2020 | NFPA | Global |
| NFPA 400 | Hazardous materials code | 2022 | NFPA | Global |
| NFPA 496 | Standard for purged and pressurized enclosures for electrical equipment | 2024 | NFPA | Véhicule |
| NFPA 497 | Recommended practice for the classification of flammable liquids, gases, or vapors and of hazardous (classified) locations for electrical installations in chemical process areas | 2024 | NFPA | Global |
| NFPA 551 | Guide for the evaluation of fire risk assessments | 2022 | NFPA | Global |
| NFPA 853 | Standard for the installation of stationary fuel cell power systems | 2020 | NFPA | Infrastructure |
| NFPA 855 | Standard for the installation of stationary energy storage systems | 2023 | NFPA | Infrastructure |
| **Rail Industry Safety and Standards Board (RISSB)** | | | | |
| RISSB AS 7486 | Railway energy storage: Rolling stock onboard electrical energy storage | 2022 | RISSB | Véhicule |
| **Society of Automotive Engineers (SAE)** | | | | |
| SAE J1616 | Recommended practice for compressed natural gas vehicle fuel | 2017 | SAE | Global |
| SAE J1739 | Potential failure mode and effects analysis (FMEA) including design FMEA, supplemental FMEA-MSR, and process FMEA | 2021 | SAE | Global |
| SAE J1766 | Recommended practice for electric, fuel cell and hybrid electric vehicle crash integrity testing | 2014 | SAE | Véhicule |
| SAE J1772 | SAE Electric vehicle and plug in hybrid electric vehicle conductive charge coupler | 2017 | SAE | Véhicule |
| SAE J1798 | Recommended practice for performance rating of electric vehicle battery | 2019 | SAE | Véhicule |
| SAE J2344 | Guidelines for electric vehicle safety | 2010 | SAE | Véhicule |
| SAE J2380 | Vibration testing of electric vehicle batteries | 2021 | SAE | Véhicule |

| Désignation | Titre | Année de publication | Éditeur | Sujet |
|---|---|---|---|---|
| SAE J2464 | Electric and hybrid electric vehicle rechargeable energy storage system (RESS) Safety and abuse testing | 2021 | SAE | Véhicule |
| SAE J2578 | Recommended practice for general fuel cell vehicle safety | 2014 | SAE | Véhicule |
| SAE J2579 | Standard for fuel systems in fuel cell and other hydrogen vehicles | 2018 | SAE | Véhicule |
| SAE J2594 | Recommended practice to design for recycling proton exchange membrane (PEM) fuel cell systems | 2023 | SAE | Véhicule |
| SAE J2600 | Compressed hydrogen surface vehicle fueling connection devices | 2015 | SAE | Infrastructure |
| SAE J2601 | Fueling protocols for light duty gaseous hydrogen surface vehicles | 2020 | SAE | Véhicule |
| SAE J2615 | Testing performance of fuel cell systems for automotive applications | 2011 | SAE | Véhicule |
| SAE J2616 | Testing performance of the fuel processor subsystem of an automotive fuel cell system | 2011 | SAE | Véhicule |
| SAE J2617 | Recommended practice for testing performance of PEM fuel cell stack sub-system for automotive applications | 2011 | SAE | Véhicule |
| SAE J2719 | Hydrogen fuel quality for fuel cell vehicles | 2020 | SAE | Véhicule |
| SAE J2799 | Hydrogen surface vehicle to station communications hardware and software | 2019 | SAE | Infrastructure |
| SAE J2929 | Safety standard for electric and hybrid vehicle propulsion battery systems utilizing lithium-based rechargeable cells | 2013 | SAE | Véhicule |
| SAE J2990 | Hybrid and EV first and second responder recommended practice | 2019 | SAE | Véhicule |
| SAE J2990/1 | Gaseous hydrogen and fuel cell vehicle first and second responder recommended practice | 2016 | SAE | Véhicule |
| SAE J3071 | Automotive battery recycling identification and cross contamination prevention | 2016 | SAE | Véhicule |
| SAE J3121 | Hydrogen vehicle crash test lab safety guidelines | 2022 | SAE | Véhicule |
| SAE J3219 | Hydrogen fuel quality screening test of chemicals for fuel cell vehicles | 2022 | SAE | Véhicule |
| SAE J3271 (WIP) | Megawatt Charging System for Electric Vehicles | À DÉTERMINER | SAE | Infrastructure |
| **Association Suisse de Normalisation (SNV)** | | | | |
| SNV SNG 10000 | Guide pour la construction de stations-service à hydrogène | 2019 | SNV | Infrastructure |

| Désignation | Titre | Année de publication | Éditeur | Sujet |
|---|---|---|---|---|
| **Standards Press of China (SPC)** | | | | |
| SPC GB/T 26466 | Stationary flat steel ribbon wound vessels for storage of high-pressure hydrogen | 2011 | SPC | Infrastructure |
| SPC GB/T 33291 | Measurement method of pressure-composition-temperature for reversible hydrogen absorption and desorption of hydrides | 2016 | SPC | Global |
| SPC GB/T 33292 | Metal hydride hydrogen storage system for fuel cells backup power | 2016 | SPC | Infrastructure |
| SPC GB/T 34542.1 | Storage and transportation systems for gaseous hydrogen – Part 1: General requirements | 2017 | SPC | Infrastructure |
| SPC GB/T 34583 | Safety technical requirements for hydrogen storage devices used in hydrogen fuelling station | 2017 | SPC | Infrastructure |
| **Laboratoires des assureurs du Canada (UL)** | | | | |
| UL 1203 | Standard for explosion-proof and dust-ignition-proof electrical equipment for use in hazardous (classified) locations | 2023 | UL | Global |
| UL 1642 | Lithium batteries | 2022 | UL | Global |
| ANSI/CAN/UL 1973 | Batteries for use in stationary and motive auxiliary power applications | 2022 | UL | Global |
| ANSI/CAN/UL 1974 | Standard for evaluation for repurposing batteries | 2018 | UL | Global |
| UL 1998 | Standard for software in programmable components | 2022 | UL | Global |
| UL 2017 | Standard for general-purpose signaling devices and systems | 2008 | UL | Global |
| UL 2075 | Standard for gas and vapor detectors and sensors | 2023 | UL | Global |
| UL 2249 | Outline of investigation for hydrogen fuel dispensing systems | 2020 | UL | Infrastructure |
| UL 2262 | Outline of investigation for fuel cell modules for use in portable and stationary equipment | 2012 | UL | Global |
| UL 2264 | Subject 2264 gaseous hydrogen generation appliances | 2021 | UL | Infrastructure |
| UL 2264A | Outline of investigation for water electrolysis type hydrogen generators | 2021 | UL | Infrastructure |
| UL 2267 | Standard for fuel cell power systems for installation in industrial electric trucks | 2020 | UL | Véhicule |
| UL 2271 | ANSI/CAN/UL/ULC Standard for batteries for use in light electric vehicle (LEV) applications | 2018 | UL | Véhicule |
| UL 2580 | Batteries for use in electric vehicles | 2022 | UL | Véhicule |

| Désignation | Titre | Année de publication | Éditeur | Sujet |
|---|---|---|---|---|
| UL 2591 | Outline of investigation for battery cell separators | 2018 | UL | Global |
| UL 2596 | Test method for thermal and mechanical performance of battery enclosure materials | 2022 | UL | Global |
| UL 268 | Standard for smoke detectors for fire alarm systems | 2023 | UL | Global |
| UL 2734 | Connectors and service plugs for use with on-board electrical vehicle (EV) charging systems | 2020 | UL | Véhicule |
| UL 4128 | Outline of investigation for intercell and intertier connectors for use in electrochemical battery system applications | 2020 | UL | Global |
| UL 429 | Standard for electrically operated valves | 2013 | UL | Global |
| UL 458 | Standard for Power Converters/Inverters and Power Converter/Inverter Systems for Land Vehicles and Marine Crafts | 2015 | UL | Véhicule |
| UL 5800 | ANSI/CAN/UL Battery fire containment products | 2020 | UL | Global |
| UL 583 | Electric-battery-powered industrial trucks | 2022 | UL | Véhicule |
| UL 60079-17 | Explosive atmospheres – part 17: Electrical installations inspection and maintenance | 2017 | UL | Global |
| UL 60335-2-34 | Household and similar electrical appliances – safety – part 2-34: particular requirements for motor-compressors | 2017 | UL | Infrastructure |
| UL 62133 | Standard for safety for secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes – Safety requirements for portable sealed secondary cells, and for batteries made from them, for use in portable applications | 2017 | UL | Véhicule |
| UL 62133-1 | Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Safety requirements for portable sealed secondary cells, and for batteries made from them, for use in portable applications – part 1: nickel systems | 2020 | UL | Véhicule |
| UL 62133-2 | Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes – Safety requirements for portable sealed secondary cells, and for batteries made from them, for use in portable applications - part 2: lithium systems | 2020 | UL | Véhicule |
| UL 746C | Standard for polymeric materials – Use in electrical equipment evaluations | 2023 | UL | Global |
| UL 80079-36 | Explosive atmospheres – part 36: Non-Electrical equipment for explosive atmospheres – Basic method and requirements | 2021 | UL | Global |
| UL 80079-37 | Explosive atmospheres – part 37: Non-Electrical equipment for explosive atmospheres – non electrical type of protection constructional safety | 2021 | UL | Global |

| Désignation | Titre | Année de publication | Éditeur | Sujet |
|---|---|---|---|---|
| UL 864 | Standard for control units and accessories for fire alarm systems | 2014 | UL | Global |
| UL 913 | Intrinsically safe apparatus and associated apparatus for use in class I, II, and III, division 1, hazardous (classified) locations | 2013 | UL | Global |
| UL 94 | Standard for tests for flammability of plastic materials for parts in devices and appliances | 2023 | UL | Global |
| UL 9540A | ANSI/CAN/UL Standard for test method for evaluating thermal runaway fire propagation in battery energy storage systems | 2019 | UL | Global |
| UL 991 | Standard for tests for safety-related controls employing solid-state devices | 2010 | UL | Global |

**Tableau B-2 :** Codes et règlements applicables

| Désignation | Titre | Année de publication | Éditeur | Sujet |
|---|---|---|---|---|
| **Gouvernement du Canada (GC)/Transports Canada (TC)** | | | | |
| L.R.C. (1985), ch. L-2 | Code canadien du travail | 2023 | GC | Global |
| DORS/87-184 | Règlement sur la santé et la sécurité au travail (trains) | 2023 | GC | Véhicule |
| DORS/2015-26 | Règlement sur le système de gestion de la sécurité ferroviaire | 2015 | GC | Global |
| DORS/87-150 | Règlement sur les normes de compétence des employés ferroviaires | 2023 | GC | Global |
| DORS/2001-286 | Règlement sur le transport des marchandises dangereuses | 2023 | TC | Global |
| **United States Department of Transportation (US DOT)** | | | | |
| 49 CFR Part 172 | Hazardous materials table, special provisions, hazardous materials communications, emergency response information, training requirements, and security plans | 2023 | US DOT | Véhicule |
| 49 CFR Part 173 | Shippers – General requirements for shipments and packagings | 2023 | US DOT | Global |
| 49 CFR Part 179 | Federal Railroad Administration – Code of federal regulations, title 49 – transportation, part 179 – Specifications for tank cars | 2023 | US DOT | Véhicule |
| 49 CFR Part 213 | Federal railroad administration – Code of federal regulations, title 49 – transportation, part 213 – track safety standards | 2023 | US DOT | Infrastructure |
| 49 CFR Part 223 | Federal railroad administration – Code of federal regulations, title 49 – transportation, part 223 – Safety glazing standards - Locomotives, passenger cars and cabooses | 2023 | US DOT | Véhicule |
| 49 CFR Part 227 | Federal Railroad Administration – Code of federal regulations, title 49 – transportation, part 227 – Occupational noise exposure | 2023 | US DOT | Véhicule |
| 49 CFR Part 229 | Federal Railroad Administration – Code of federal regulations, title 49 – transportation, part 229 – Railroad locomotive safety standards | 2023 | US DOT | Véhicule |
| 49 CFR Part 238 | Federal Railroad Administration – Code of federal regulations, title 49 – transportation, part 238 – Passenger equipment safety standards | 2023 | US DOT | Véhicule |

# Recherche du Groupe CSA

Dans le but de favoriser l'adoption de solutions normatives fondées sur le consensus afin d'accroître la sécurité et de favoriser l'innovation, le Groupe CSA soutient et effectue des recherches dans des domaines qui visent les industries nouvelles ou émergentes ainsi que sur des sujets et des questions qui touchent une vaste gamme de parties prenantes actuelles et potentielles. Les résultats de nos programmes de recherche étaieront l'élaboration de solutions normatives futures, ils offriront aux industries des directives provisoires sur la conception et l'adoption de nouvelles technologies et ils contribueront à démontrer notre engagement continu envers l'édification d'un monde meilleur, plus sécuritaire et plus durable.

GROUPE CSA[MC]

© 2024 Association canadienne de normalisation. Tous droits réservés.