

LES NOUVEAUX MODES DE PROPULSION EN TUNNEL ROUTIER

Risques et enjeux : état des lieux partagé



AVERTISSEMENT

Les documents d'information ont pour but de fournir une information sur une technique ou un problème nouveau ou insuffisamment traité par ailleurs. Le lecteur pourra y trouver des repères susceptibles de l'aider dans son activité. Le contenu et les éventuelles conclusions présentés ne doivent pas être considérés comme des recommandations du CETU. Bien que le maximum soit fait pour s'assurer de la fiabilité des sources utilisées, la responsabilité du CETU ou des auteurs du document ne saurait être engagée.

LES NOUVEAUX MODES DE PROPULSION EN TUNNEL ROUTIER

Risques et enjeux : état des lieux partagé

janvier 2024

Centre d'Études des Tunnels

25, avenue François Mitterrand

69500 BRON – France

Tél. 33 (0)4 72 14 34 00

Fax. 33 (0)4 72 14 34 30

cetu@developpement-durable.gouv.fr

www.cetu.developpement-durable.gouv.fr

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	7
1 CADRE LÉGISLATIF ET CONTEXTE ÉCONOMIQUE DU DÉVELOPPEMENT DES NOUVEAUX MODES DE PROPULSION	8
1.1 Le cadre législatif	8
1.1.1 Les engagements de la France sur la réduction des gaz à effet de serre	8
1.1.2 Les règles actuellement applicables à la circulation des véhicules à énergie alternative	10
1.2 Le contexte économique	11
1.2.1 La filière des véhicules légers particuliers	11
1.2.2 La filière des véhicules utilitaires légers et lourds	11
2 DESCRIPTION DES TECHNOLOGIES ET DES ÉVÉNEMENTS REDOUTÉS	12
2.1 Le cas des véhicules fonctionnant à l'électricité stockée en batterie	12
2.1.1 La technologie	12
2.1.2 Les systèmes de sécurité	12
2.1.3 Les événements redoutés	12
2.2 Le cas des véhicules fonctionnant au gaz naturel comprimé (GNC)	14
2.2.1 La technologie	14
2.2.2 Les systèmes de sécurité	14
2.2.3 Les événements redoutés	15
2.3 Le cas des véhicules fonctionnant à l'hydrogène comprimé	16
2.3.1 La technologie	16
2.3.2 Les systèmes de sécurité	17
2.3.3 Les événements redoutés	17
2.4 Le cas des poids lourds fonctionnant au gaz naturel liquéfié (GNL)	18
2.4.1 La technologie	18
2.4.2 Les systèmes de sécurité	18
2.4.3 Les événements redoutés	18
2.5 Les véhicules motorisés à l'hydrogène de type LH2 et ICE-H2	19
2.6 Les perspectives d'évolutions technologiques	20
2.6.1 Le renforcement des systèmes de sécurité des réservoirs de gaz	20
2.6.2 Le « retrofit » des bus	20
2.6.3 Les développements technologiques plus lointains	21
3 ESTIMATION DES RISQUES LIÉS AUX ÉVÉNEMENTS REDOUTÉS	22
3.1 L'estimation des fréquences d'occurrence	22
3.1.1 Les principales hypothèses et les choix méthodologiques	22
3.1.2 Le cas des véhicules fonctionnant à l'électricité stockée en batterie	23
3.1.3 Le cas des véhicules fonctionnant au GNC	23
3.1.4 Le cas des véhicules fonctionnant à l'hydrogène comprimé	23
3.1.5 Le cas des poids lourds fonctionnant au GNL	24
3.2 Les conséquences pour la sécurité des usagers	25
3.2.1 Les principales hypothèses et les paramètres d'influence	25
3.2.2 Le cas des véhicules fonctionnant à l'électricité stockée en batterie	27
3.2.3 Le cas des véhicules fonctionnant au GNC	27
3.2.4 Le cas des véhicules fonctionnant à l'hydrogène comprimé	29
3.2.5 Le cas des poids lourds fonctionnant au GNL	30
3.3 Les conséquences pour les structures et les équipements des tunnels	31
3.3.1 Les conséquences d'un emballement thermique	31
3.3.2 Les conséquences d'un feu torche	31
3.3.3 Les conséquences des phénomènes explosifs	31

4 NOUVEAUX ENJEUX POUR LES ACTEURS DE LA SÉCURITÉ	32
4.1 Les nouveaux enjeux pour les gestionnaires et les exploitants de tunnels routiers	32
4.1.1 L'évaluation du nombre de véhicules à énergie alternative empruntant un tunnel donné	32
4.1.2 La prise en compte des véhicules à énergie alternative dans l'étude spécifique des dangers	32
4.1.3 L'identification des véhicules à énergie alternative impliqués dans un événement	33
4.1.4 Les moyens de surveillance et de détection pour anticiper les événements redoutés spécifiques	33
4.1.5 La prévention et la gestion des conséquences pour l'utilisateur	33
4.1.6 L'impact sur les structures et sur la réouverture du tunnel après un événement	33
4.1.7 Les impacts sur l'environnement	34
4.1.8 La formation et la collaboration de tous les acteurs	34
4.1.9 Les autres enjeux liés à l'augmentation du parc de véhicules propulsés aux nouvelles énergies	34
4.2 Les nouveaux enjeux pour les services de secours	35
4.2.1 Avant l'intervention	35
4.2.2 Durant l'intervention	35
4.3 Les nouveaux enjeux pour les gestionnaires de flottes de transport public	37
4.3.1 Les contraintes pesant sur l'usage des véhicules électriques	37
4.3.2 Les contraintes pesant sur l'usage des véhicules au GNV et à l'hydrogène comprimé	37
4.3.3 Les contraintes liées au coût des nouveaux modes de propulsion	38
5 CONCLUSIONS	39
6 LISTE DES FIGURES ET ILLUSTRATIONS	41
7 BIBLIOGRAPHIE	42
GLOSSAIRE	43



INTRODUCTION

La lutte contre le changement climatique est aujourd'hui une préoccupation internationale de premier ordre.

En France, pour viser la neutralité carbone, une évolution vers un parc automobile très peu émetteur de CO₂ est considérée comme indispensable, car le secteur du transport routier est un contributeur majeur aux émissions de gaz à effet de serre. Il représente environ 30 % des émissions en France¹, contre seulement 14 % à l'échelle mondiale. La part des émissions relatives aux transports en France est alourdie par rapport à celle des autres secteurs (énergie, bâtiment, industrie), car ces derniers ont beaucoup plus recours à l'électricité, dont la production est largement décarbonée.

L'évolution vers un parc automobile très peu émetteur de CO₂ est, pour cette raison, fortement soutenue par différentes politiques réglementaires et fiscales. Sous cette impulsion, les propulsions thermiques essence et diesel évoluent vers la motorisation thermique au gaz naturel, ou sont remplacées par des motorisations électriques, alimentées par des batteries lithium-ion ou des piles à combustible à hydrogène.

Les autorités organisatrices de la mobilité sont en première ligne dans ce mouvement, car la loi les oblige depuis 2020 à acquérir des véhicules dits à faibles émissions.

Il est de coutume de désigner globalement ces technologies (motorisations thermiques au gaz naturel et motorisations électriques) comme des « nouvelles énergies de propulsion », ou par le sigle anglais NEC pour « *New Energy Carriers* » (nouveaux vecteurs énergétiques), bien que la plupart d'entre elles soient apparues il y a déjà plusieurs décennies².

Avec ces technologies, des événements redoutés supplémentaires pour la sécurité des personnes en tunnel ont émergé,

qui doivent être pris en compte. L'événement principal supplémentaire est l'explosion, risque qui est très improbable pour les véhicules à propulsion essence ou diesel.

Si la description des événements redoutés peut susciter des craintes, le choix politique de privilégier les modes de propulsion les plus « propres » pose la question de leur acceptation en tunnel et de leur accompagnement par des mesures de réduction du risque. Jusqu'à présent, la règle appliquée consiste à exclure des tunnels interdits aux marchandises dangereuses les bus fonctionnant au gaz naturel, suite à une recommandation émise par le BEA-TT en 2006.

L'enjeu est donc aujourd'hui de réinterroger cette règle, en examinant de quelle manière les nouveaux modes de propulsion peuvent se conjuguer avec un usage en tunnel, sachant qu'un certain niveau de risque est déjà accepté dans ce type d'ouvrage pour les modes de propulsion classiques.

Le présent document vise à présenter de façon équilibrée ces différents aspects, et ainsi constituer un référentiel sur lequel les acteurs concernés pourront s'appuyer pour construire les réponses à apporter à l'enjeu que représente l'introduction des nouveaux modes de propulsion dans les tunnels routiers.

Après avoir rappelé le contexte et décrit le développement des nouveaux modes de propulsion, les risques en tunnel sont présentés de façon détaillée, en les comparant avec les risques existants – l'incendie essentiellement. Enfin, dans une dernière partie, les enjeux que représentent les nouveaux modes de propulsion pour les différents acteurs – opérateurs de transports publics, gestionnaires et exploitants de tunnels routiers, services d'intervention – sont décrits.

1. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat-2022/9-panorama-francais-des-gaz-a>

2. La voiture électrique, en particulier, a précédé l'invention du moteur à explosion et représentait une part importante du marché automobile au début du XX^{ème} siècle ; les véhicules au gaz naturel sont également très répandus dans certains pays depuis plusieurs décennies.

CADRE LÉGISLATIF ET CONTEXTE ÉCONOMIQUE DU DÉVELOPPEMENT DES NOUVEAUX MODES DE PROPULSION

La réduction des émissions de gaz à effet de serre est aujourd'hui un objectif largement partagé par l'opinion publique.

En France, la tenue de la COP 21 en 2015 a été une étape majeure. À cette occasion, la plupart des nations mondiales se sont engagées à prendre les mesures nécessaires pour limiter le réchauffement de l'atmosphère à 2°C en 2100. Le droit européen a aussi adopté cet objectif, qui s'impose aujourd'hui aux États membres. La réduction des émissions est également vue comme une opportunité économique, avec la perspective de créer de nouvelles activités. Enfin, la volonté de lutter contre le changement climatique est

renforcée par celle de réduire la pollution atmosphérique locale, car leurs sources sont pour beaucoup communes. La demande des populations pour l'amélioration de la qualité de l'air ambiant étant extrêmement forte, l'Union européenne applique une forte pression aux États membres pour aller dans ce sens.

Ce contexte est donc particulièrement favorable au développement des nouveaux modes de propulsion qui est encouragé – voire imposé – par les textes législatifs, dans un milieu économique qui est prêt à de gros investissements pour en faire un fort levier de croissance.

1.1

LE CADRE LÉGISLATIF

La France a produit une série de textes législatifs pour encadrer la transition écologique. Les principaux éléments en sont la Stratégie Nationale Bas-Carbone, la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV – loi n°2015-992 du 17 août 2015), la Loi d'Orientation des Mobilités (LOM – Loi n° 2019-1428 du 24 décembre 2019), et la loi dite « climat et résilience » (loi n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets) qui instaure la création de zones laissant les voitures les plus polluantes à l'extérieur des centres-villes dans les grandes agglomérations (ZFE-m).

1.1.1 Les engagements de la France sur la réduction des gaz à effet de serre

Avec l'adoption du Paquet Énergie-Climat 2030 en octobre 2014, l'Union européenne a conclu un accord assorti d'objectifs fixés à trois échéances³ :

- à court terme (d'ici 2030) : réduction de ses émissions de gaz à effet de serre de 40 % par rapport à 1990 ;
- à moyen terme (d'ici 2050) : diminution de ses émissions de 80 à 95 % par rapport à 1990 ;
- à long terme : zéro émission nette en 2100, pour garantir une trajectoire d'augmentation maximale de 2°C de la température.

En vue d'atteindre ces objectifs, la France s'est fixé une feuille de route avec la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte : la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC), qui donne des orientations à suivre dans tous les secteurs d'activités pour assurer la transition vers une économie bas-carbone, circulaire et durable. La SNBC définit une trajectoire de réduction des émissions de gaz à effet de serre jusqu'en 2050, et fixe des objectifs à court et moyen termes – les budgets carbone –, avec deux ambitions :

- atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 ;
- réduire l'empreinte carbone de la consommation des Français. Les décideurs publics, à l'échelle nationale comme territoriale, doivent suivre ces orientations.

3. #COP21 : les engagements nationaux de la France.

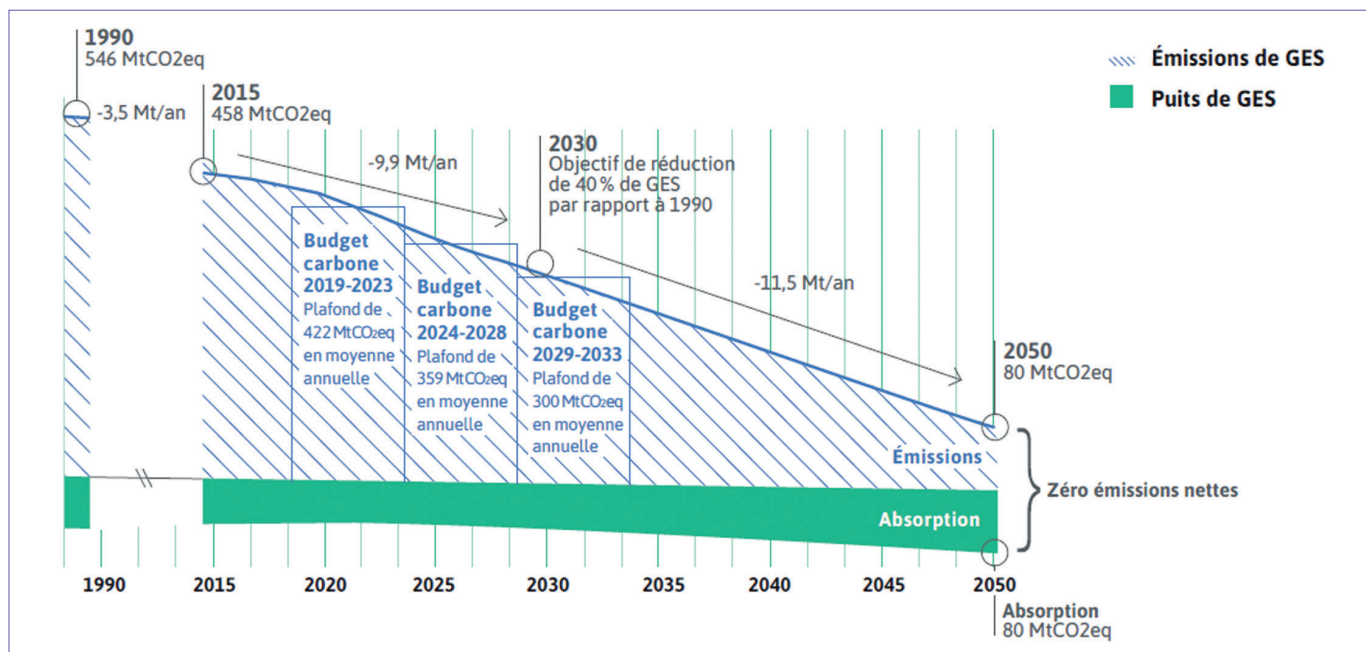


Figure 1 : Évolution prévue des émissions et des puits de GES sur le territoire français entre 1990 et 2050 (en MtCO₂eq). Inventaire CITEPA 2018 et scénario SNBC révisée (neutralité carbone)⁴

Les contraintes applicables aux mobilités routières

Le transport routier représente environ 30 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) en France. À défaut d'une diminution drastique des mobilités routières, le respect des engagements nationaux en matière de réduction des émissions nationales de GES implique nécessairement une modification profonde du parc de véhicules routiers.

Parmi les premières mesures contraignantes allant en ce sens, la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance

Verte (LTECV) du 17 août 2015 impose aux Autorités organisatrices de la mobilité (AOM) une proportion minimale d'autobus à faibles émissions dans leurs acquisitions de véhicules neufs (article L224-8-2 du Code de l'environnement) : 50 % à compter du 1^{er} janvier 2020 et 100 % à compter du 1^{er} janvier 2025.

De plus, le Parlement a habilité – par l'article 74 de la LOM – le gouvernement français à transposer la directive européenne « Véhicules propres » au sein du droit français. Ainsi, le droit français a été mis en conformité avec les exigences de la législation européenne par l'ordonnance du 17 novembre 2021.

Détail des contraintes de renouvellement de flottes publiques

L'ordonnance du 17 novembre 2021 fixe des objectifs applicables au renouvellement annuel des flottes publiques de véhicules légers, de poids lourds et de transports collectifs, notamment en ce qui concerne l'acquisition et l'utilisation de véhicules à très faibles émissions, et définit les véhicules à faibles et très faibles émissions.

Concernant les lignes de transport en commun urbaines par autobus, suivant la zone de la commune (A, B ou C suivant le classement de l'arrêté du 22 décembre 2021) où s'inscrit la majorité du roulage de la ligne :

- les véhicules à faibles émissions sont :
 - pour les zones A, les véhicules propulsés par du bioGNV, ou ceux de type hybride utilisant un carburant d'origine renouvelable exclusivement, c'est-à-dire non mélangé à du carburant d'origine fossile,
 - pour les zones B, les véhicules des deux types ci-dessus, ainsi que les véhicules GNV, hybrides rechargeables ou utilisant un carburant alternatif,
 - pour les zones C, tous les véhicules précédemment cités, ainsi que les véhicules diesel EURO VI ;
- les véhicules à très faibles émissions sont les véhicules électriques, les trolleybus et les véhicules à hydrogène, quelle que soit la zone.

Le renouvellement des flottes de bus doit comprendre au minimum 50 % de véhicules à faibles émissions depuis 2020, et cette exigence sera portée à 100 % à partir de 2025.

Parmi ces véhicules à faibles émissions, la moitié au moins doivent être des véhicules à très faibles émissions depuis le 1^{er} juillet 2022 dans les communes de plus de 250 000 habitants.

4. Stratégie Nationale Bas-Carbone SNBC – <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>

La loi du 24 décembre 2019 d'orientation des mobilités a en outre réformé en profondeur le cadre général des politiques de mobilités, en intégrant les enjeux environnementaux. Élaborée à la suite des Assises nationales de la mobilité, elle vise quatre objectifs :

- sortir de la dépendance à l'automobile ;
- accélérer la croissance des nouvelles mobilités ;
- réussir la transition écologique ;
- programmer les investissements dans les infrastructures de transport en favorisant les transports durables.

1.1.2 Les règles actuellement applicables à la circulation des véhicules à énergie alternative

Le Code de la route ne mentionne pas explicitement la possibilité d'interdire, pour des raisons de sécurité, la circulation sur certaines voies en fonction d'un critère lié à la carburation des véhicules.

Une restriction à l'usage des véhicules à énergie alternative est toutefois apportée par le règlement des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), rubrique n°2935, qui interdit l'usage des parcs de stationnement couverts aux véhicules GPL non équipés de soupape de sécurité. La soupape de sécurité étant devenue obligatoire pour tous les véhicules, y compris existants, cette disposition est aujourd'hui caduque et n'a pas été reprise dans le règlement de sécurité des établissements recevant du public de type PS (parcs de stationnement ouverts au public), adopté en 2006.

Les réglementations les plus récentes visent plutôt à faciliter la circulation des véhicules à énergie alternative qui sont classés dans les catégories les plus favorables de la vignette « Crit'air », en restreignant l'accès à certaines zones – en particulier le centre des grandes villes – aux véhicules les plus polluants. L'usage des véhicules à essence, et surtout diesel, a ainsi été découragé dans les zones urbaines denses avec la mise en place des ZFE-m, dont le nombre a été porté à dix en France⁵ par le décret n°2020-1138 du 16 septembre 2020.

La tendance réglementaire semble donc davantage d'encourager l'utilisation des véhicules à énergie alternative, plutôt que de restreindre leur circulation.

Le cas des bus fonctionnant au gaz naturel reste toutefois particulier. En août 2005, deux incendies dans des dépôts de bus à Nancy et Montbéliard ont conduit à des éclatements de réservoirs de GNC. Le Bureau d'Enquêtes sur les Accidents de Transports Terrestres (BEA-TT, Ministère chargé des Transports) a alors été mandaté pour examiner ces événements, et s'est montré favorable, dans son rapport de mars 2006, à la généralisation des dispositifs de décharge à haut débit, afin d'assurer une vidange plus rapide du réservoir et minimiser le risque d'éclatement. Ce dispositif augmentant cependant le risque d'une accumulation de nuage inflammable en milieu confiné, le BEA-TT a formulé la recommandation suivante : « **L'usage des autobus au GNV dans des tunnels interdits au transit des transports de matières dangereuses devrait être exclu.** » La très grande majorité des tunnels routiers urbains étant interdits au transit des TMD, l'application de la recommandation du BEA-TT revenait de fait à exclure l'usage de bus GNV sur les lignes de transports collectifs routiers urbains empruntant des tunnels.

Aucune disposition réglementaire générale n'a repris la recommandation du BEA-TT. Cependant, dans ses deux derniers rapports d'activité couvrant la période 2009-2017, la CNESOR (Commission Nationale d'Évaluation de la Sécurité des Ouvrages Routiers) a préconisé d'en rester à cette recommandation.

Il en résulte une contrainte assez forte pour les AOM locales, qui doivent utiliser des bus diesel ou électriques sur les lignes empruntant des tunnels, alors que – dans un contexte qui a énormément évolué depuis 2006 – la proportion du nombre de bus au gaz naturel a fortement augmenté, favorisée par le contexte législatif déjà évoqué, et que des améliorations techniques sur les systèmes GNV ont été apportées sous l'effet de plusieurs évolutions du règlement UNECE R110 [1].

Il faut noter que, dans le département des Hauts-de-Seine (92), un arrêté préfectoral du 5 juillet 2019 interdit l'accès des voies couvertes du quartier d'affaires de la Défense à tous les véhicules utilisant le GNV, quelle que soit sa forme, ce qui empêche le recours à l'usage du GNV pour toutes les flottes urbaines – de livraison, de collecte des déchets, etc. – qui se développe pourtant très largement en France.

5. Aix-Marseille-Provence, Montpellier-Méditerranée, Nice-Côte d'Azur, Rouen-Normandie, Strasbourg, Toulon-Provence-Méditerranée et Toulouse ont été ajoutées par le décret aux ZFE-m déjà existantes à Paris, Lyon et Grenoble.

1.2.1 La filière des véhicules légers particuliers

La période 2020-2022 a confirmé que la filière automobile entrait dans une période de transition majeure.

Trois grandes évolutions se sont ainsi amorcées : la transformation du marché et de ses acteurs, l'élargissement du cadre réglementaire, et l'émergence de nouvelles attentes sociétales.

Pour accompagner ces évolutions, la filière automobile a mis en place une feuille de route stratégique⁶ afin d'être actrice de la transition énergétique à travers la poursuite des efforts d'amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules et le développement des énergies de propulsion alternatives (notamment l'électricité, avec la question de son stockage en batteries). Cette feuille de route vise, d'ici 2030, un marché du véhicule léger particulier 100 % électrifié en Europe. La décision européenne d'interdiction des véhicules thermiques neufs en 2035, si elle est confirmée, va dans le sens de cet objectif.

1.2.2 La filière des véhicules utilitaires légers et lourds

Les véhicules utilitaires légers et lourds (poids lourds, cars et bus) sont la cible de réglementations leur imposant de contribuer à l'effort de lutte contre le changement climatique.

Le défi pour les constructeurs des véhicules de cette catégorie est ainsi de parvenir à une diminution rapide des émissions sans déstabiliser l'économie du transport routier, activité essentielle, en croissance, mais fragile, à très faibles marges et très fragmentée.

Les développements technologiques s'orientent vers trois directions : la motorisation électrique, la motorisation thermique au gaz, et l'utilisation de l'hydrogène.

La stratégie de l'industrie pour la motorisation électrique des véhicules lourds est présentée dans le Livre blanc *L'électricité pour la filière des véhicules industriels* (PFA, FFC, AVERE) [2].

Compte tenu des technologies disponibles et des dispositions législatives, ce sont les applications urbaines sur des parcours relativement courts (100 à 300 km par tournée) qui constituent le marché visé en priorité pour les véhicules utilitaires électriques, avec une possible évolution vers des usages régionaux – avec des tonnages croissants – entre 2025 et 2030.

À plus long terme, l'hydrogène ou les batteries solides ouvriront d'autres perspectives pour les véhicules électriques, notamment sur des parcours de plus longue distance. Concernant l'hydrogène, le document *Position Technique de Filière, Hydrogène et Piles à Combustible* (PFA) [3] apporte des éléments d'analyse.

Aux côtés du véhicule électrique, il se peut que le moteur thermique perde encore quelques années à travers l'utilisation des carburants alternatifs, comme le gaz, ou avec la motorisation hybride.

Les motorisations GNV suscitent ainsi un intérêt croissant auprès des professionnels et des collectivités, qu'ils soient prescripteurs ou utilisateurs de flottes de véhicules lourds et utilitaires. Pouvant être utilisé sous forme liquide (GNL) ou bien gazeuse (GNC), le GNV peut s'appuyer sur une offre de véhicules qui continue de s'étoffer et sur un réseau de ravitaillement qui se densifie. Les émissions des véhicules GNV réussissent à respecter les seuils de la norme Euro VI, sans recours nécessaire à des systèmes de dépollution multiples et complexes, en particulier pour ce qui concerne les émissions d'oxydes d'azote et de particules. Grâce à un contenu carbone plus faible que celui du pétrole, le gaz naturel utilisé pour les véhicules lourds présente des gains en matière d'émissions de CO₂ pouvant atteindre 15 % comparativement aux carburants traditionnels.

Le Livre blanc *Le Gaz Naturel pour la filière des véhicules industriels* (PFA, FFC, AFGNV) [4] présente les perspectives de développement de la propulsion au gaz pour les véhicules lourds.

6. PFA : Tendances automobiles, Feuille de route technologique stratégique.

DESCRIPTION DES TECHNOLOGIES ET DES ÉVÉNEMENTS REDOUTÉS

Ce chapitre décrit successivement, par type de nouvelle énergie, les technologies mises en jeu, les systèmes de sécurité associés et les événements redoutés.

Les événements redoutés liés aux véhicules fonctionnant aux nouvelles énergies sont classés en deux catégories : les événements redoutés classiques et les événements redoutés spécifiques.

Les événements redoutés classiques sont ceux qui peuvent advenir aussi bien sur les véhicules classiques (c'est-à-dire ceux fonctionnant uniquement avec de l'essence ou du diesel) que sur les véhicules à énergie alternative, lorsque les systèmes de sécurité de ces derniers fonctionnent normalement.

Parmi les événements redoutés classiques, seuls les accidents et incendies sont ici étudiés, car eux seuls sont susceptibles d'avoir un impact significatif sur la sécurité des usagers.

Les événements redoutés spécifiques sont ceux qui peuvent advenir sur les véhicules à énergie alternative mais dont la survenue est très improbable – voire impossible – sur les véhicules classiques (hors transports de marchandises dangereuses). Il s'agit des événements qui peuvent survenir lorsqu'un véhicule à énergie alternative subit un accident ou un incendie et que les systèmes de sécurité dont il est doté sont endommagés, font l'objet d'un dysfonctionnement, ou sont tout simplement insuffisants pour éviter l'événement.

2.1 LE CAS DES VÉHICULES FONCTIONNANT À L'ÉLECTRICITÉ STOCKÉE EN BATTERIE

Il existe deux grandes catégories de véhicules électriques : les véhicules fonctionnant exclusivement à l'électricité, et les véhicules hybrides pouvant fonctionner à la fois avec un carburant classique et l'électricité.

Du point de vue de la sécurité, les véhicules hybrides présentent à la fois les risques propres à un véhicule classique et ceux d'un véhicule électrique, mais généralement à un degré bien moindre pour ce qui concerne la partie électrique, car les véhicules hybrides ont des batteries avec des capacités plus faibles que les véhicules purement électriques.

Seule l'étude des véhicules fonctionnant exclusivement à l'électricité est donc ici approfondie. On pourra appliquer ces éléments d'information aux véhicules hybrides, en retenant que les conséquences d'un événement redouté lié à la partie électrique pour ce type de véhicule sont généralement plus faibles, malgré des fréquences comparables.

2.1.1 La technologie

Dans un véhicule électrique, une ou plusieurs batteries alimentent un moteur électrique.

La capacité énergétique des batteries est actuellement de l'ordre de 40 à 120 kWh pour les véhicules légers. Plusieurs batteries permettent d'assurer une capacité totale de 250 à 450 kWh pour les bus, et plus de 500 kWh pour les camions. Les analyses et résultats présentés dans les chapitres 3.1.2 et 3.2.2 sont basés sur une étude qui a pris en compte des capacités individuelles de batteries limitées à 80 kWh, ainsi que la présence de plusieurs batteries sur les bus et les poids lourds.

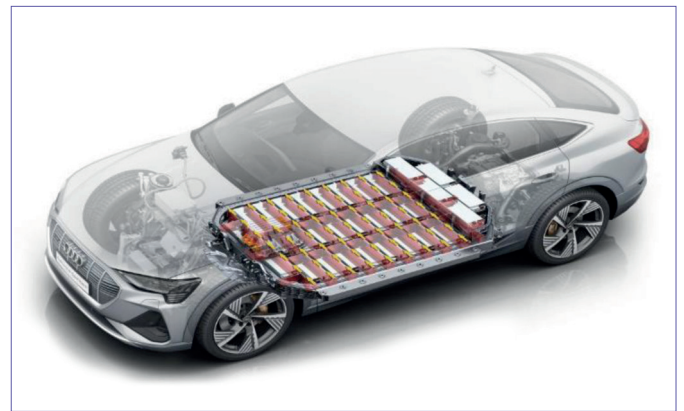


Figure 2 : Exemple de position des batteries sur un véhicule léger électrique

Les batteries sont généralement stockées en partie basse dans les véhicules légers et les poids lourds, et en partie haute – à l'arrière – dans les bus.

Il existe plusieurs types de batteries. On s'intéressera dans ce document uniquement aux risques associés aux technologies les plus courantes de batteries lithium-ion, c'est-à-dire les batteries à cathode de type NMC (nickel-manganèse-cobalt) – dominantes aujourd'hui sur le marché européen – et celles de type NCA (nickel-cobalt-aluminium), qui ont fait l'objet de nombreuses études indépendantes.

Les batteries de type LFP (lithium-fer-phosphate), en développement, sont a priori significativement plus sûres, et donc couvertes par les analyses qui sont présentées plus loin.

D'autres technologies particulières ne sont pas prises en compte dans la suite du propos, en raison d'un manque d'information ou d'études indépendantes. Aucune série de tests ou études indépendants n'a ainsi permis d'évaluer l'aptitude des dispositions adoptées dans les véhicules utilisant des batteries au LMP (Lithium Métal Polymère) à réduire, voire supprimer les risques spécifiques identifiés pour ce type de batteries (court-circuit, emballement thermique plus rapide qu'avec des batteries sans lithium métal, inflammation voire réaction violente du lithium sous forme métallique, projection de particules métalliques en fusion, difficulté d'extinction marquée).

2.1.2 Les systèmes de sécurité

Les véhicules électriques sont dotés de dispositifs destinés à limiter le risque de court-circuit ou de montée en température. Ces barrières, actives ou passives, permettent de protéger l'enveloppe de la batterie, d'éviter le passage d'un courant trop important dans les cellules et de contrôler les réactions électrochimiques.

L'emballement thermique est le principal événement redouté pour les véhicules électriques (cf. 2.1.3). Pour le prévenir, les véhicules de ce type sont dotés d'un système de gestion de la batterie (ou Battery Management System – BMS), qui est un système électronique embarqué sur la batterie, destiné à empêcher la plupart des défauts électriques pouvant mener à l'emballement, notamment le court-circuit externe et la surcharge. Ce système permet également d'optimiser le rendement et la durée de vie des batteries. Il doit évidemment avoir été correctement conçu, être adapté à la chimie exacte de la batterie et demeurer fonctionnel à tout moment.

Les dispositifs de sécurité obligatoires sont prescrits par le règlement UNECE R100 [5], dont la dernière version est entrée en vigueur en juin 2021. Elle prescrit divers essais sur les batteries (vibrations, chocs, exposition à la chaleur), qui ne doivent pas manifester de signe de dégradation ou d'emballement thermique lorsqu'elles y sont soumises. Ces essais imposent toutefois des agressions assez modérées en comparaison de celles générées par les incendies pouvant advenir en tunnel. Par exemple, l'exposition à la flamme prévue dans ces essais dure seulement 7 minutes, ce qui est très éloigné de la durée totale d'un incendie complet de véhicule. Cette durée peut néanmoins représenter la durée suffisante aux occupants d'un véhicule pour en sortir. La révision n°3 du R100, entrée en vigueur en 2021, impose la réalisation d'une analyse de risques détaillée et la mise en œuvre de dispositifs d'alerte des usagers en cas d'élévation anormale de température.

2.1.3 Les événements redoutés

Les événements classiques

Les accidents et les incendies survenant sur les véhicules électriques ne présentent a priori pas de danger supplémentaire par rapport aux véhicules classiques [7] et [8].

Les événements spécifiques

De rares incidents et certains essais sur batteries nues ont montré que le risque d'explosion suite à un choc violent sur la batterie ne pouvait être totalement exclu. Néanmoins, l'état de l'art ne permet pas encore d'évaluer les conséquences d'un tel événement, ni sa fréquence prévisionnelle. En conséquence, dans ce document, seul l'emballement thermique a été pris en compte comme phénomène spécifique aux véhicules électriques fonctionnant avec des batteries lithium-ion (cf. figure 3).

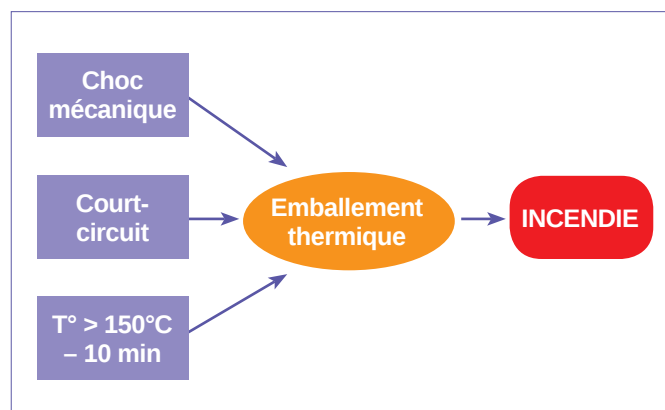


Figure 3 : Emballement thermique : arbre des causes et conséquences

L'emballement thermique est une surchauffe anormale, auto-renforçante, provoquée par les réactions électro-chimiques exothermiques se produisant dans les batteries. L'emballement thermique peut entraîner principalement un incendie même si le risque d'explosion ne peut être complètement exclu.

Ce phénomène peut avoir plusieurs origines : court-circuit, choc mécanique, températures élevées, surcharge. Dans ce dernier cas, une exposition à 150°C pendant 10 minutes est estimée nécessaire pour déclencher l'emballement.

L'emballement thermique peut survenir alors qu'un usager est prisonnier du véhicule suite à un choc mécanique. Le phénomène est très difficile à stopper, de même que l'incendie qui en résulte quasi-systématiquement ou auquel il contribue si un départ de feu est à l'origine de l'emballement. L'usager piégé aurait ainsi un risque accru de blessure.

L'incendie d'une batterie suite à un emballement thermique peut avoir un aspect visuel différent des feux habituels (turbulences violentes dans l'enveloppe des flammes) sans pour autant développer une puissance significativement plus élevée (cf. [7] et [8]).

L'emballement peut aussi provoquer la projection d'éléments, mais elle est par nature limitée, et le capotage de la batterie agit comme un bouclier de protection dans la très grande majorité des situations⁷.

7. Dans le cas particulier des batteries à cellules cylindriques, il y a un risque accru d'effet missile avec percement du capotage, mais ce type de cellules est rarement utilisé par les constructeurs.

Les véhicules électriques : ce qu'il faut retenir

- Les batteries sont stockées en partie basse sur les véhicules légers et les poids lourds, et en partie haute sur les bus.
- Les technologies les plus courantes de batterie lithium ion sont les batteries à cathode de type NMC ou NCA), qui ont fait l'objet de nombreuses études indépendantes pour évaluer les risques qui leur sont associés.
- L'événement redouté spécifique aux batteries est l'**emballement thermique**. Il est générateur ou consécutif d'un incendie alors difficile à éteindre.
- Des dispositifs de sécurité, sous forme de barrières actives et passives, sont utilisés pour protéger l'enveloppe de la batterie et limiter le risque de court-circuit et de montée en température.

2.2 LE CAS DES VÉHICULES FONCTIONNANT AU GAZ NATUREL COMPRIMÉ (GNC)

2.2.1 La technologie

Un véhicule fonctionnant au gaz naturel comprimé est un véhicule à moteur à combustion interne, pour lequel le carburant liquide des véhicules classiques est remplacé par un gaz stocké dans un réservoir sous pression à 200 bars.



Figure 4 : Schéma d'un véhicule GNC

Les moteurs des véhicules légers sont toujours à bi-carburant, le deuxième carburant – généralement de l'essence – étant nécessaire pour le démarrage. Un ou deux réservoirs sont positionnés à l'arrière du véhicule, sous la banquette ou en fond de coffre.

Les moteurs des poids lourds et des bus sont à mono-carburant. Ce type de véhicule est doté de plusieurs réservoirs. Pour les poids lourds, ils sont positionnés en partie basse ou sur les côtés, à l'arrière de la cabine ou dans le châssis. Pour les bus, ils sont généralement situés sur le toit, et plus rarement en soute (cas de « rétrofit », c'est-à-dire transformation d'un bus fonctionnant avec un carburant classique en un bus fonctionnant au GNC).

2.2.2 Les systèmes de sécurité

Le principal système de sécurité installé sur les véhicules fonctionnant au GNC est le thermo-fusible, généralement dénommé par l'acronyme anglais TPRD (*Thermally activated Pressure Relief Device*).

Au moins un thermo-fusible est installé sur chaque réservoir.

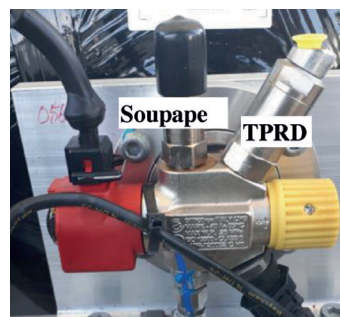


Figure 5 : Principaux systèmes de sécurité d'un véhicule GNC

À 110°C, le thermo-fusible relâche le gaz contenu dans le réservoir afin de faire baisser sa pression interne et éviter ainsi que l'intégrité mécanique de son enveloppe ne soit atteinte, du fait d'une pression trop forte ou d'une température trop élevée. Le thermo-fusible fonctionne par rupture ou fusion d'un élément calibré ; il ne se referme donc pas.

En complément des thermo-fusibles, afin de renforcer la prévention de la rupture du réservoir, certains modèles de bus sont équipés de soupapes qui s'ouvrent en cas d'augmentation anormale de la pression interne (ouverture à 290 bars par exemple).

Les dispositifs de sécurité obligatoires sont listés par le règlement CEE ONU R110 [1]. Outre le thermo-fusible, le règlement impose des vannes manuelle et automatique, un limiteur de débit, etc. Il prescrit la température de déclenchement du thermo-fusible (110°C) mais pas ses autres caractéristiques, notamment son diamètre, qui détermine le débit de vidange et a une influence sur les événements redoutés⁸. La décharge des thermo-fusibles doit, depuis 2022, être verticale et orientée vers le haut pour les réservoirs montés sur le toit des véhicules (cas des bus). Dans tous les cas, elle ne doit s'effectuer ni vers un autre réservoir de GNC, ni vers un passage de roue, ni vers une source de chaleur telle que l'échappement.

8. Le diamètre est généralement de 4 mm pour les véhicules lourds.

2.2.3 Les événements redoutés

Les événements classiques

L'accident d'un véhicule fonctionnant au GNC ne présente a priori pas de danger supplémentaire par rapport à celui d'un véhicule classique, sauf s'il provoque un endommagement du thermo-fusible.

Concernant l'incendie, les sources d'ignition sur un véhicule fonctionnant au GNC sont très proches de celles d'un véhicule classique. En effet, la technologie de propulsion est la même, et les différences liées aux autres pièces mécaniques sont non significatives vis-à-vis d'un départ du feu. Le risque de survenance d'un incendie, qui peut par exemple être provoqué par une surchauffe du moteur, des freins, ou par une fuite d'huile, est donc équivalent. En cas d'incendie, l'élévation de température est très supérieure à 110°C, température d'ouverture du thermo-fusible. Donc, si le thermo-fusible fonctionne correctement, il s'ouvre et relâche le gaz contenu dans le réservoir dans des conditions ambiantes qui sont suffisantes pour que le rejet s'enflamme. Le feu torche ainsi généré ne contribue toutefois pas à l'incendie de façon significative (cf. 3.2.3). Le pic de puissance qu'il provoque est en effet trop limité dans le temps pour avoir un impact significatif sur l'incendie et affecter les conditions de sécurité dans le tunnel.

Les événements spécifiques

Trois événements spécifiques peuvent advenir sur les véhicules GNC :

- le **feu torche** non consécutif à un incendie sur le véhicule GNC ;
- l'**explosion de nuage** non consécutive à un incendie sur le véhicule GNC ;
- la **rupture de réservoir** qui peut se produire en cas d'incendie sur le véhicule GNC, si le thermo-fusible ne joue pas son rôle.

Ces trois événements spécifiques sont explicités ci-après.

Sans que le véhicule GNC ne soit incendié, l'ouverture ou une fuite au niveau du thermo-fusible suite à un choc sur le véhicule GNC ou une défaillance consécutive à un problème survenu lors du remplissage du réservoir peut engendrer un **feu torche**. Ce feu torche se produit uniquement si, à proximité immédiate, il y a une source d'inflammation présentant une température supérieure à la température d'auto inflammation (TAI) du GNC ou possédant une énergie supérieure à l'énergie minimale d'inflammation (EMI) de ce gaz. Cette ouverture du thermo fusible peut également être provoquée par des fumées chaudes d'un incendie distant et générer un feu torche dans les mêmes conditions.

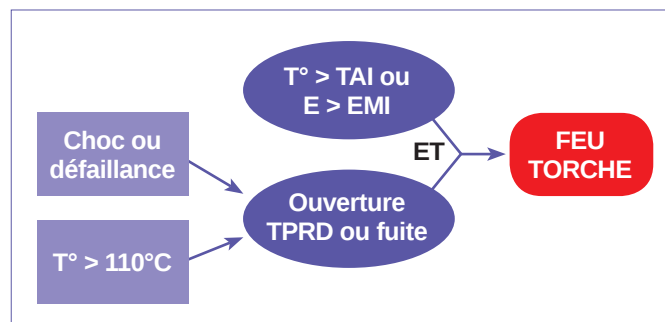


Figure 6 : Feu torche : arbre des causes et conséquences

Sans que le véhicule GNC ne soit incendié, l'ouverture ou une fuite au niveau du thermo-fusible pour les mêmes raisons que dans le cas du feu torche peut générer une **explosion de nuage (VCE)** si trois conditions sont réunies :

- à proximité immédiate du thermo-fusible, aucune source d'inflammation ayant une température supérieure à la TAI ou une énergie supérieure à l'EMI n'est présente ;
- une partie du gaz rejeté prend la forme d'un nuage inflammable, c'est-à-dire un nuage dans lequel la concentration est comprise entre la limite inférieure d'explosivité (LIE) et la limite supérieure d'explosivité (LES) ;
- le nuage de gaz inflammable rencontre une source d'inflammation ayant une température supérieure à la TAI ou une énergie supérieure à l'EMI.

Si l'explosion de nuage est exclue pour les véhicules fonctionnant au gazole, elle est théoriquement possible pour les véhicules fonctionnant à l'essence, mais hautement improbable en pratique⁹.

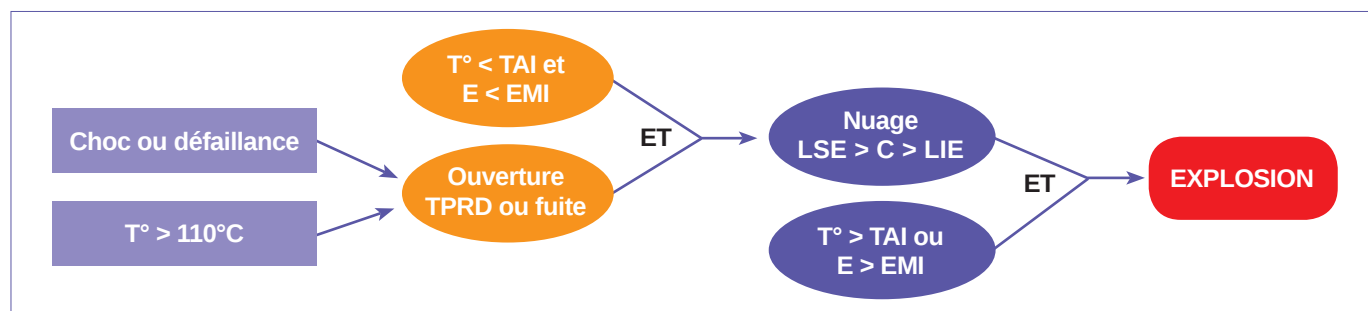


Figure 7 : Explosion de nuage : arbre des causes et conséquences

9. Dans le cas du gaz, la formation d'un nuage est immédiate s'il n'y a pas inflammation du rejet ; or pour l'essence, il faut que le débit de la fuite de carburant et les caractéristiques de la surface d'épandage engendrent d'abord la constitution d'une nappe suffisamment importante, puis que les conditions de température permettent de former, par évaporation de la nappe, un nuage contenant une masse inflammable.

En cas d'élévation de température, si le thermo-fusible présente un défaut de fonctionnement et ne joue pas son rôle, une **rupture du réservoir** peut se produire.

En cas d'agression thermique maximale – correspondant à un cas de figure où l'ensemble du réservoir est pris dans l'incendie du véhicule lui-même – et de dysfonctionnement du thermo-fusible, le délai avant rupture du réservoir est de 8 à 20 minutes¹⁰. L'impact de cet événement redouté sur les usagers est donc à relativiser, car à ce moment-là, un certain nombre d'entre eux ont en principe évacué.

Compte tenu des normes en vigueur applicables aux réservoirs, leur percement n'a pas été retenu comme cause possible de rupture, car jugé très improbable.

La rupture du réservoir pourrait aussi advenir en cas d'agression thermique localisée sur une partie de réservoir où il n'y a pas de thermo-fusible. Ce cas n'a pas été traité explicitement par la suite, car le délai avant survenance de la rupture serait assurément plus élevé qu'en cas d'agression thermique maximale, et les conséquences pour les usagers seraient les mêmes qu'en cas d'agression thermique maximale.

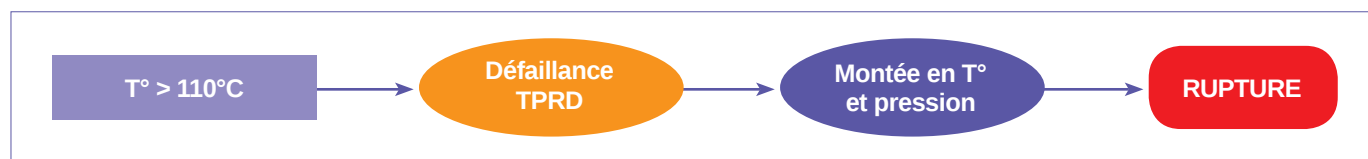


Figure 8 : Rupture de réservoir : arbre des causes et conséquences

Les véhicules au gaz naturel comprimé (GNC) : ce qu'il faut retenir

- ▶ Les réservoirs de gaz sont pressurisés à 200 bars et positionnés en partie basse sur les véhicules légers et les poids lourds, et en partie haute sur les bus.
- ▶ Le principal système de sécurité est le thermo-fusible (TPRD), qui relâche le gaz contenu dans le réservoir afin de faire baisser sa pression interne avant sa rupture, s'il est soumis à une pression trop forte ou à une température trop élevée ; le thermo-fusible s'ouvre à 110°C ; il y a au moins un thermo-fusible sur chaque réservoir.
- ▶ Trois événements redoutés spécifiques existent pour les véhicules GNC :
 - le **feu torche**, qui peut se produire suite à un choc ou une défaillance lors du remplissage, si une source de température ou d'énergie suffisante est présente à proximité immédiate du thermo-fusible ;
 - l'**explosion de nuage**, qui peut survenir suite à un choc ou une défaillance lors du remplissage, s'il n'y a pas de source de température ou d'énergie suffisante à proximité immédiate du thermo-fusible, et que le gaz rejeté par le thermo-fusible prend la forme d'un nuage inflammable et rencontre plus loin une telle source ;
 - la **rupture de réservoir**, qui peut advenir suite à une défaillance du thermo-fusible en cas d'incendie.

2.3 LE CAS DES VÉHICULES FONCTIONNANT À L'HYDROGÈNE COMPRIMÉ

2.3.1 La technologie

Les véhicules fonctionnant à l'hydrogène comprimé sont dotés d'une pile à combustible qui transforme l'hydrogène en électricité. L'électricité ainsi produite à bord du véhicule alimente directement un moteur électrique pour la propulsion du véhicule, et recharge une batterie d'appoint si cette dernière n'est pas chargée à pleine capacité.

Cette batterie est mise à contribution lors d'un fort appel de puissance. Elle est, généralement, environ dix fois moins puissante que celles utilisées pour les véhicules électriques¹¹.

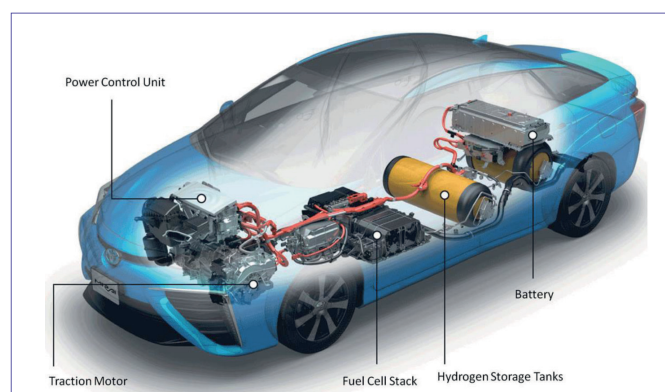


Figure 9 : Schéma d'un véhicule fonctionnant à l'hydrogène comprimé

10. Le délai de 8 minutes est une valeur majorante pour l'évaluation de la sécurité (délai minimal) qui suppose un flux incident de 50 kW/m², valeur particulièrement élevée qui ne serait possible que dans des conditions bien particulières.

11. Dans le cas particulier des véhicules dit « range extender », la capacité peut n'être que deux fois inférieure.

L'hydrogène est stocké à l'état gazeux dans un réservoir sous pression, à 350 bars pour la majorité des bus, des utilitaires et des poids lourds, ou à 700 bars, principalement pour les véhicules légers. Le positionnement des réservoirs dépend du type de véhicule. Il est le même que pour les réservoirs de gaz naturel comprimé (cf. 2.2.1).

2.3.2 Les systèmes de sécurité

Le principal système de sécurité installé sur les véhicules fonctionnant à l'hydrogène est le thermo-fusible.

Les systèmes obligatoires sont listés par le règlement UNECE R134 [6]. Ce règlement précise que des thermo-fusibles doivent être installés sur les réservoirs afin de relâcher l'hydrogène et faire baisser la pression avant que l'intégrité mécanique de son enveloppe ne soit atteinte, du fait d'une pression trop forte ou d'une température trop élevée. Les prescriptions concernant les thermo-fusibles des véhicules à hydrogène sont globalement identiques à celles fixées par le R110 pour les véhicules GNC, décrites au 2.2.2.

2.3.3 Les événements redoutés

Les événements classiques

Les conséquences d'un accident survenant sur un véhicule fonctionnant à l'hydrogène ne présentent pas de différence significative par rapport à celles survenant sur un véhicule classique pour le même accident, dès lors que le thermo-fusible n'est pas touché.

En termes de source d'incendie, la différence entre un véhicule propulsé à l'hydrogène et un véhicule classique peut être considérée comme non significative. En effet, le caractère

très inflammable des fluides échangés dans le véhicule à hydrogène est en quelque sorte compensé par un moteur électrique qui présente moins de sources d'ignition qu'un moteur à combustion. En cas d'incendie, l'élévation de température est très supérieure à la température d'ouverture du thermo-fusible, donc même si un feu torche peut se produire, il n'a pas impact significatif sur l'incendie et n'affecte pas les conditions de sécurité dans le tunnel (cf. 2.2.3 pour plus de détail).

Les événements spécifiques

Trois événements spécifiques peuvent advenir sur les véhicules fonctionnant à l'hydrogène :

- le **feu torche** non consécutif à un incendie sur le véhicule fonctionnant à l'hydrogène ;
- l'**explosion de nuage** non consécutive à un incendie sur le véhicule fonctionnant à l'hydrogène ;
- la **rupture de réservoir** qui peut se produire en cas d'incendie sur le véhicule fonctionnant à l'hydrogène, si le thermo-fusible ne joue pas son rôle.

Ces événements redoutés sont identiques à ceux existant pour les véhicules GNC. Les explications et graphiques donnés au 2.2.3 pour les véhicules GNC sont donc valables pour les véhicules à hydrogène et le lecteur pourra s'y reporter. Les différences de propriétés physico-chimiques entre les deux gaz amènent cependant des conséquences et des fréquences quantitativement différentes entre GNC et hydrogène (cf. 3.1 et 3.2).

Si l'emballement thermique est possible sur la batterie des véhicules d'hydrogène, la taille des batteries, généralement bien plus faible que celles des véhicules électriques (cf. 2.3.1), en limite généralement l'impact.

Les véhicules fonctionnant à l'hydrogène comprimé : ce qu'il faut retenir

- ▶ Les réservoirs d'hydrogène sont généralement pressurisés à 350 bars pour les véhicules utilitaires, bus et poids lourds, et à 700 bars pour les véhicules légers ; ils sont positionnés en partie basse sur les véhicules légers et les poids-lourds, et en partie haute sur les bus.
- ▶ Le principal système de sécurité est le thermo fusible (TPRD), qui relâche le gaz contenu dans le réservoir afin de faire baisser sa pression interne avant sa rupture s'il est soumis à une pression trop forte ou à une température trop élevée ; le thermo-fusible s'ouvre à 110°C.
- ▶ Trois événements redoutés spécifiques existent pour les véhicules à hydrogène :
 - le **feu torche**, qui peut se produire suite à un choc ou une défaillance résultant d'un problème survenu lors du remplissage du réservoir, si une source de température ou d'énergie suffisante est présente à proximité immédiate du thermo-fusible ;
 - l'**explosion de nuage**, qui peut survenir suite à un choc ou une défaillance résultant d'un problème survenu lors du remplissage du réservoir, s'il n'y a pas de source de température ou d'énergie suffisante à proximité immédiate du thermo-fusible, et que le gaz rejeté par le thermo-fusible prend la forme d'un nuage inflammable et rencontre plus loin une telle source ;
 - la **rupture de réservoir**, qui peut advenir suite à une défaillance du thermo-fusible en cas d'incendie.

2.4 LE CAS DES POIDS LOURDS FONCTIONNANT AU GAZ NATUREL LIQUÉFIÉ (GNL)

2.4.1 La technologie

Dans un véhicule fonctionnant au gaz naturel liquéfié, un réservoir alimente un moteur à combustion interne, comme dans le cas d'un véhicule fonctionnant au gaz naturel comprimé. La seule différence est le mode de stockage, liquide et non gazeux.



Figure 10 : Réservoir GNL sur un poids lourd

Les véhicules fonctionnant avec ce type de carburant sont principalement les poids lourds. Leur moteur est à monocarburant, et leurs réservoirs sont positionnés en partie basse. Deux modes principaux de stockage sont employés : l'un à une pression de l'ordre de 10 bars et une température d'environ -130°C , l'autre à une pression de 1,1 bar et une température de -160°C .

2.4.2 Les systèmes de sécurité

Le principal système de sécurité dont sont équipés les poids lourds GNL est un ensemble de soupapes. Chaque réservoir en possède généralement deux, tarées respectivement à 16 et 24 bars. Elles ont pour but de prévenir les risques de rupture du réservoir en relâchant le gaz et faisant ainsi baisser la pression avant que l'intégrité mécanique de son enveloppe ne soit atteinte, du fait d'une pression trop forte ou d'une température trop élevée.

2.4.3 Les événements redoutés

Les événements classiques

Les événements classiques pouvant toucher les poids lourds GNL sont similaires à ceux identifiés pour les véhicules GNC (cf. 2.2.3).

Ainsi, l'accident d'un poids lourd fonctionnant au GNL ne présente a priori pas de danger supplémentaire par rapport à celui d'un poids lourd classique, dès lors qu'il ne provoque pas l'endommagement d'une ou plusieurs soupapes.

Concernant l'incendie, les sources d'ignition sur un poids lourd fonctionnant au GNL sont également très proches de celles d'un poids lourd classique. En effet, la technologie de propulsion est la même et les différences liées aux autres pièces mécaniques sont non significatives vis-à-vis d'un départ du feu. Le risque de survenance d'un incendie, qui peut par exemple être provoqué par une surchauffe du moteur, des freins, ou par une fuite d'huile, est donc équivalent. En cas d'incendie, les soupapes permettent de relâcher le liquide contenu dans le réservoir si sa pression interne augmente, avant que son intégrité ne soit touchée. Un feu torche est possible lors du relâchement du gaz liquide par la soupape, mais son impact est limité, car le pic de puissance qu'il provoque est trop limité dans le temps pour avoir un impact significatif sur l'incendie et affecter les conditions de sécurité dans le tunnel.

Les événements spécifiques

Trois événements spécifiques peuvent advenir sur les poids lourds fonctionnant au GNL :

- le **feu torche** non consécutif à un incendie sur le véhicule GNL (cf. figure 11) ;
- l'**explosion de nuage** non consécutive à un incendie sur le véhicule GNL (cf. figure 12) ;
- la **rupture de réservoir** qui peut se produire en cas d'incendie sur le véhicule GNL, si le/les soupapes ne jouent pas leur rôle (cf. figure 13).

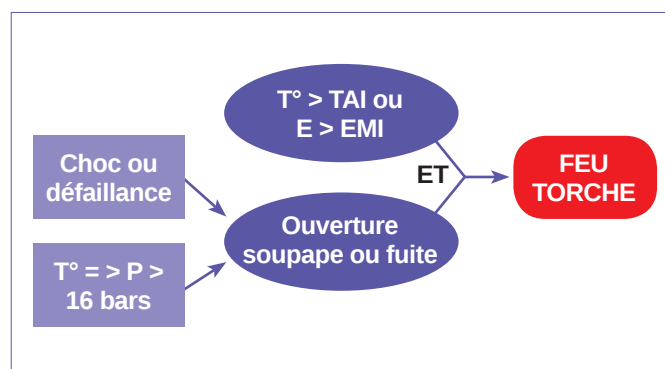


Figure 11 : Feu torche sur un poids lourd fonctionnant au GNL : arbre des causes et conséquences

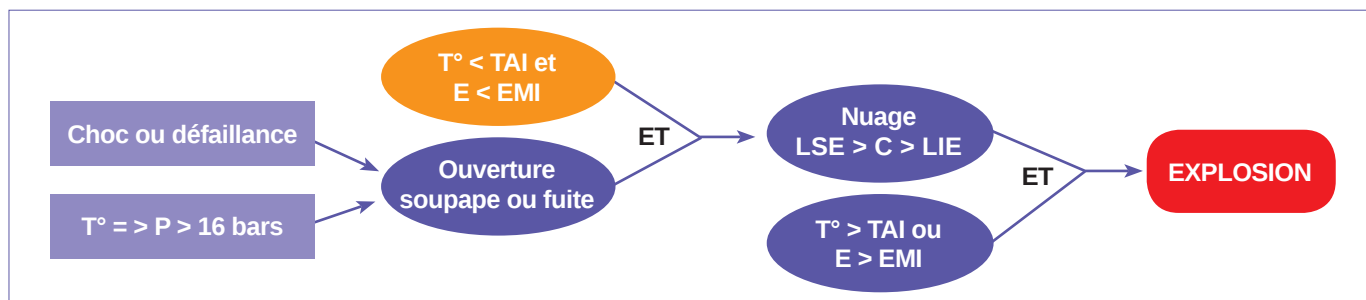


Figure 12 : Explosion de nuage sur un poids lourd fonctionnant au GNL : arbre des causes et conséquences

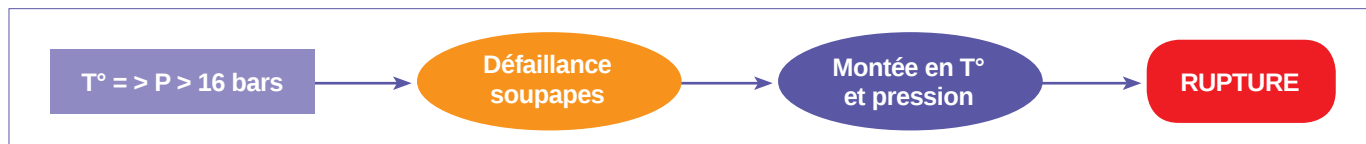


Figure 13 : Rupture de réservoir sur un poids lourd fonctionnant au GNL : arbre des causes et conséquences

Les véhicules au gaz naturel liquéfié (GNL) : ce qu'il faut retenir

- ▶ Le gaz naturel liquéfié est un mode de propulsion qui concerne exclusivement les poids lourds.
- ▶ Le gaz naturel liquéfié est stocké à l'état liquide dans des réservoirs ayant une pression et une température de respectivement 10 bars et – 130°C ou 1,1 bar et – 160°C.
- ▶ Le principal système de sécurité est la soupape, qui relâche le gaz contenu dans le réservoir afin de faire baisser sa pression interne avant sa rupture, s'il est soumis à une pression trop forte ou à une température trop élevée ; chaque réservoir possède généralement deux soupapes, tarées respectivement à 16 et 24 bars.
- ▶ Trois événements redoutés spécifiques existent pour les poids lourds GNL :
 - le **feu torche**, qui peut se produire suite à un choc ou une défaillance lors du remplissage, si une source de température ou d'énergie suffisante est présente à proximité immédiate de la soupape ;
 - l'**explosion de nuage**, qui peut survenir suite à un choc ou une défaillance lors du remplissage, s'il n'y a pas de source de température ou d'énergie suffisante à proximité immédiate de la soupape, et que le gaz rejeté par la soupape prend la forme d'un nuage et rencontre plus loin une telle source ;
 - la **rupture de réservoir**, qui peut advenir suite à une défaillance de la soupape en cas d'incendie.

2.5 LES VÉHICULES MOTORISÉS À L'HYDROGÈNE DE TYPE LH2 ET ICE-H2

Deux types de véhicules motorisés à l'hydrogène (LH2 et ICE-H2) existent – mais de façon marginale –, aux côtés des véhicules à hydrogène dotés d'une pile à combustible avec stockage de l'hydrogène sous forme gazeuse comprimée (cf. 2.3).

Les véhicules de type LH2 sont semblables aux véhicules à hydrogène dotés d'une pile à combustible avec stockage de l'hydrogène sous forme gazeuse comprimée, à la seule différence que l'hydrogène est stocké sous forme liquéfiée (LH2). Si le mode de stockage sous forme liquéfiée permet d'embarquer des quantités d'hydrogène nettement supérieures à la forme comprimée, il demeure toutefois compliqué à mettre en œuvre. De ce fait, les applications

actuelles de cette technologie sont pour l'heure essentiellement spatiales et maritimes.

Les véhicules de type ICE-H2 sont des véhicules dans lesquels l'hydrogène alimente un moteur à combustion interne. Pour le transport de marchandises, cette technologie pourrait concurrencer le système actuel de pile à combustible associée à un moteur électrique, où l'évacuation de la chaleur produite par la pile à combustible est une difficulté. En effet, sur un moteur à combustion interne, une grande partie de la chaleur produite peut-être évacuée par l'échappement, possibilité que n'offrent pas les moteurs électriques. Les véhicules routiers à combustion interne d'hydrogène ne sont toutefois pas encore commercialisés à une échelle significative.

2.6 LES PERSPECTIVES D'ÉVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES

Ce chapitre présente les évolutions technologiques attendues pour les types de véhicules présentés dans ce document, qui correspondent à des modèles qui étaient disponibles en 2018. Il est donc possible que lors de la parution de ce document, certaines de ces perspectives aient déjà été concrétisées.

2.6.1 Le renforcement des systèmes de sécurité des réservoirs de gaz

Doublement des thermo-fusibles

L'ajout d'un second thermo-fusible sur les réservoirs de stockage de gaz des véhicules routiers est une évolution attendue afin de réduire le taux de survenance des ruptures de réservoir.

Il existe en effet le risque de ne pas détecter une agression thermique très localisée du réservoir, si elle est située loin d'un unique thermo-fusible. Dans une telle situation, le thermo-fusible unique restant à température ambiante ne s'ouvre pas, avec pour conséquence possible un risque de rupture du réservoir.

On notera que l'ajout d'un second thermo-fusible est toutefois susceptible d'augmenter le taux de survenance d'une explosion de nuage puisque, en cas de choc suffisamment violent, deux thermo-fusibles au lieu d'un peuvent être endommagés et libérer le gaz contenu dans le réservoir.

Ajout de soupapes aux thermo-fusibles et inversement

Actuellement, les réservoirs de GNC sont sécurisés à l'aide de thermo-fusibles réagissant à la température, et ceux de GNL le sont à l'aide de soupapes réagissant à la pression (cf. 2.2.2 et 2.4.2).

Sur quelques modèles de bus, toutefois, les réservoirs de GNC sont équipés de soupapes en complément des thermo-fusibles. Le gain apporté par l'ajout de soupapes en complément de thermo-fusibles pourrait être limité, car l'un des facteurs de rupture est l'affaiblissement structurel dû à la température.

Néanmoins, l'extension de cette pratique consistant à doubler les systèmes permettant de relâcher le gaz si nécessaire mériterait d'être étudiée. Il pourrait par exemple être envisagé d'ajouter des thermo-fusibles aux soupapes sur les poids lourds au GNL.

On notera enfin que le doublement des systèmes permettant de relâcher le gaz si nécessaire est susceptible d'augmenter le taux de survenance d'une explosion de nuage. En effet, en cas de choc suffisamment violent, deux systèmes de relâchement de gaz au lieu d'un peuvent être endommagés et libérer le gaz contenu dans le réservoir.

2.6.2 Le « rétrofit » des bus

Le « rétrofit » électrique ou gaz consiste à transformer un véhicule classique en véhicule fonctionnant à l'électricité ou au gaz (GNC ou hydrogène).

L'intérêt principal de l'opération de « rétrofit » est financier. Il permet en effet de disposer d'un véhicule doté d'un mode de propulsion alternatif pour un coût inférieur à celui de l'achat d'un véhicule neuf fonctionnant avec un mode d'énergie identique.

Cette économie initiale doit toutefois être relativisée, d'une part car le coût d'installation reste important, et d'autre part car les coûts d'entretien et de maintenance d'un véhicule transformé sont nettement supérieurs à ceux d'un véhicule neuf, puisque toutes les parties du véhicule qui ne sont pas concernées par la modification conservent leur âge. Cela pose la question de la rentabilité économique du « rétrofit » d'un véhicule dont la durée d'exploitation sera plus faible que celle d'un véhicule acheté neuf. En outre, il est possible que la capacité de stockage – donc l'autonomie – soit inférieure à celle d'un véhicule neuf, du fait des limites imposées par la taille de la soute pour l'installation des réservoirs, le véhicule n'ayant pas été conçu pour cela.

Outre l'aspect économique, la transformation d'un véhicule pose des questions en termes de sécurité. Il n'est en effet pas certain que le niveau de sécurité du véhicule transformé soit équivalent à celui d'un véhicule neuf. Par exemple, concernant les bus transformés, les réservoirs sont positionnés dans les anciennes soutes et non sur le toit, ce qui est de nature à aggraver les conséquences d'un feu torche sur l'évacuation des usagers. Vis-à-vis des services de secours, cette différence de positionnement des réservoirs peut aussi représenter un risque supplémentaire, du fait de la difficulté à identifier les bus à énergie alternative, dont les réservoirs ou les batteries ne sont pas directement visibles.

Il faut aussi souligner que les obligations réglementaires relatives au renouvellement des flottes publiques de transport en commun (cf. 1.1.1) concernent l'achat de véhicules neufs, et excluent donc le recours aux opérations de « rétrofit ». Le « rétrofit » n'aurait donc d'intérêt que pour les autorités administratives qui souhaiteraient aller au-delà de la réglementation, en procédant à un renouvellement de leur flotte anticipé par rapport aux échéances réglementaires.

A ce propos, on peut citer l'exemple de l'autorité administrative des transports d'une région majeure par sa taille et sa flotte de bus qui n'utilise les bus transformés que pour les itinéraires qui ne sont pas compatibles avec la circulation de bus à énergie alternative neufs. Un exemple d'utilisation est celui des lignes empruntant des passages inférieurs dont le gabarit réduit ne permet pas la circulation de bus dotés de réservoirs ou batteries sur leur toit.

De façon générale, à la date de parution de ce document, l'utilisation des bus transformés reste expérimentale et rare. Son développement ne pourra s'amplifier que si des réponses sont apportées aux interrogations que soulève cette transformation.

2.6.3 Les développements technologiques plus lointains

Dans ce secteur en pleine mutation que constituent les mobilités routières, les développements technologiques sont nombreux. Certains n'ont pas encore atteint le stade du prototype mais pourraient modifier l'usage des énergies alternatives pour les véhicules routiers, et les risques qui en découlent.

Sans aucun caractère d'exhaustivité, certains de ces développements sont évoqués ci-dessous.

Concernant les véhicules électriques, un développement en cours concerne les batteries à électrolyte solide. La seule batterie de ce type existant actuellement est la batterie LMP, qui pose les questions évoquées au § 2.1.1 concernant l'utilisation du lithium métal. D'autres batteries à électrolyte solide sont toutefois à l'étude, avec l'objectif d'atteindre des autonomies équivalentes à celles des véhicules classiques à nombre

de batteries constant par rapport aux modèles électriques existants. Les batteries à électrolyte solide pourraient en outre présenter des avantages en termes de sécurité du fait de l'absence d'électrolyte inflammable.

Dans le domaine des véhicules à hydrogène, les recherches se poursuivent pour progresser en matière de stockage du gaz à l'état liquide (cf. 2.5) afin de proposer des autonomies importantes pour le transport longue distance. On peut s'attendre à ce que les risques de cette technologie soient proches de ceux du GNL, et simplement à moduler en fonction des caractéristiques des gaz sensiblement différentes. Si les phénomènes dangereux sont similaires, leur fréquence et les conséquences des phénomènes pourront par conséquent être différents.

Enfin, concernant aussi bien le GNC que l'hydrogène – qui sont actuellement stockés à haute pression –, des études sont menées pour évaluer la possibilité de les stocker par absorption dans des structures poreuses (*Metal Organic Frameworks* – MOFs, charbons actifs). Ce mode de stockage aurait l'avantage de supprimer les principaux événements redoutés pour ces types de véhicules (cf. 2.3.3), mais son application aux véhicules routiers n'est pas assurée et les perspectives de commercialisation demeurent donc très lointaines.

Synthèse : les événements redoutés spécifiques (ERS) par mode de propulsion				
ERS / ÉNERGIE	Électrique	Gaz naturel comprimé	Hydrogène comprimé	Gaz naturel liquide
Emballlement thermique	ERS		ERS	
Feu torche		ERS	ERS	ERS
Explosion de nuage		ERS	ERS	ERS
Rupture de réservoir		ERS	ERS	ERS

ESTIMATION DES RISQUES LIÉS AUX ÉVÉNEMENTS REDOUTÉS

Comme cela a été précisé précédemment dans ce document, les accidents et les incendies qui peuvent survenir tant sur les véhicules classiques que sur les véhicules à énergie alternative sont qualifiés d'événements redoutés classiques. Les événements redoutés qui ne peuvent survenir que sur les véhicules à énergie alternative sont pour leur part qualifiés d'événements redoutés spécifiques.

Le risque lié aux événements redoutés spécifiques est qualifié de risque direct si ces événements sont consécutifs à un accident ou un incendie survenant directement sur

le véhicule à énergie alternative. Le risque lié aux événements redoutés spécifiques est pour sa part qualifié de risque indirect si ces événements sont déclenchés par le foyer ou les fumées chaudes d'un incendie survenant sur un autre véhicule¹² et se propageant jusqu'au véhicule fonctionnant aux nouvelles énergies¹³.

L'estimation des risques repose sur l'estimation des fréquences d'occurrence, l'évaluation des conséquences pour les personnes et enfin l'analyse des conséquences pour les structures et les équipements.

3.1 L'ESTIMATION DES FRÉQUENCES D'OCCURRENCE

L'estimation des fréquences d'occurrence est issue de travaux réalisés par le CETU et l'INERIS [7] et [8].

3.1.1 Les principales hypothèses et les choix méthodologiques

Les événements redoutés classiques

Les accidents et les incendies sont des événements redoutés qui concernent à la fois les véhicules fonctionnant aux nouvelles énergies et les véhicules classiques. Comme indiqué dans le chapitre 2, il n'y a pas de différence significative entre ces deux catégories de véhicules pour ce type d'incidents.

En l'absence d'un retour d'expérience suffisant concernant les véhicules à énergie alternative, les taux habituels retenus pour ces véhicules sont ceux habituellement utilisés pour les véhicules classiques. Ils ne sont donc pas rappelés dans ce document, qui s'attache à décrire le risque additionnel que représentent les véhicules à énergie alternative par rapport aux véhicules classiques.

Les événements redoutés spécifiques

Le retour d'expérience pour les événements redoutés spécifiques aux véhicules à énergie alternative étant extrêmement faible – encore plus faible que pour les accidents et les incendies –,

les taux de survenance ont été principalement estimés à l'aide de formules théoriques. Afin qu'elles soient facilement applicables pour calculer un ordre de grandeur d'occurrence d'événement, ces formules ont été simplifiées par rapport à celles présentées dans l'étude CETU - INERIS dont elles sont issues [7] et [8].

Les formules données tiennent compte de la phénoménologie des événements redoutés (cf. chapitre 2), des propriétés de l'énergie considérée et des taux nationaux d'accidents et d'incendies en tunnel routier [11]. Elles ont été établies en supposant que les caractéristiques des systèmes correspondent aux prescriptions minimales des règlements applicables. En conséquence, les résultats obtenus sont majorants dans les cas où les systèmes sont équipés de dispositifs de sécurité complémentaires (double thermo-fusible par exemple, cf.2.2.2). On gardera donc à l'esprit que les formules comportent d'inévitables incertitudes, mais que les taux obtenus sont majorants et fournissent un ordre de grandeur des fréquences d'occurrence.

Les formules sont présentées afin que les taux de survenance des événements redoutés puissent être déterminés dans n'importe quel contexte de trafic ou de pénétration des énergies. Ils sont exprimés en nombres d'événements pour $10^8 \times$ véhicules $\times$ kilomètres parcourus. Pour en déduire les fréquences sur un intervalle de temps choisi et pour un tunnel donné, il suffit donc de multiplier les taux par la longueur de l'ouvrage et le nombre de véhicules l'empruntant dans chaque sens de circulation pendant cet intervalle de temps.

12. En effet, dans un tunnel, contrairement à l'air libre, les fumées d'un incendie sont confinées et se déplacent dans l'ouvrage avant évacuation par les têtes ou par l'intermédiaire d'un système dédié.

13. Le cas d'un nuage de gaz se propageant jusqu'à une source d'inflammation lointaine du véhicule dont il est issu est a priori exclue. En effet, la masse inflammable deviendra rapidement non significative après la fin du rejet et restera localisée au voisinage du véhicule au gaz.

La présentation des résultats

Les taux de survenance des événements redoutés spécifiques aux véhicules à énergie alternative sont présentés comparativement à celui d'un incendie d'un véhicule de tout type, afin qu'il soit facile de les positionner dans l'échelle des fréquences des événements redoutés courants¹⁴. Le taux de survenance d'un incendie sur un véhicule de tout type est d'environ un incendie pour 10⁸ véhicules x kilomètres parcourus.

3.1.2 Le cas des véhicules fonctionnant à l'électricité stockée en batterie

Le seul événement redouté identifié pour les véhicules électriques fonctionnant aux batteries lithium-ion est l'incendie éventuellement suivi d'un emballement thermique (cf. 2.1.3).

Sur la base de l'étude du phénomène, il est fait l'hypothèse que la fréquence estimée de l'incendie d'un véhicule électrique est la même que pour un véhicule à motorisation classique. Il s'agit d'une hypothèse conservatoire, car la motorisation des véhicules électriques comporte moins de sources potentielles d'ignition. Elle a toutefois été retenue car, en l'absence de retour d'expérience suffisant, il est délicat de quantifier cette différence en termes de fréquence.

3.1.3 Le cas des véhicules fonctionnant au GNC

Risques directs

Les taux de survenance sont calculés à l'aide des formules suivantes, dont les paramètres sont $\tau_{\text{type-veh}}$ (taux du type de véhicule considéré dans le trafic : véhicule léger, véhicule utilitaire léger, poids lourds, bus, etc) et $\tau_{\text{pénétration}}$ (taux de pénétration des véhicules au GNC pour le type de véhicule retenu) :

- taux de survenance d'un feu torche suite à un choc ou une défaillance du thermo-fusible consécutive à un problème survenu lors du remplissage du réservoir (T_{FT}) :
$$T_{\text{FT}} = 0,0823 \times \tau_{\text{type-veh}} \times \tau_{\text{pénétration}} \text{ événements pour } 10^8 \text{ véh} \cdot \text{km} ;$$
- taux de survenance d'une explosion de nuage suite à un choc ou à une défaillance du thermo-fusible consécutive à un problème survenu lors du remplissage du réservoir (T_{VCE}) :
$$T_{\text{VCE}} = 0,371 \times \tau_{\text{type-veh}} \times \tau_{\text{pénétration}} \text{ événements pour } 10^8 \text{ véh} \cdot \text{km} ;$$

- taux de survenance d'une rupture de réservoir suite à incendie du véhicule (T_{RUPTURE}) :

$$T_{\text{RUPTURE}} = 10^{-3} \times \tau_{\text{type-veh}} \times \tau_{\text{pénétration}} \times \tau_{\text{incendie}} \text{ événements pour } 10^8 \text{ véh} \cdot \text{km}.$$

À titre d'illustration, pour un taux de véhicules légers de 95 % dans le trafic, un taux de pénétration de 2 % du GNC¹⁵ au sein des véhicules légers et le taux d'incendie rappelé au 3.1.1, le taux de survenance d'un feu torche sur un véhicule léger est environ 640 fois plus faible que le taux de survenance d'un incendie de véhicule classique de tout type. Pour l'explosion de nuage et la rupture de réservoir, ce ratio est respectivement d'environ 140 et 26 000.

Risques indirects

Aucun risque additionnel indirect provoqué par les véhicules légers ou les poids lourds au GNC n'est à prendre en compte (cf. 3.2.1). Seuls sont donc traités ici les risques indirects provoqués par les bus au GNC.

Pour un bus, le calcul du taux de survenance d'un feu torche ou d'une explosion de nuage déclenchée par les fumées d'un incendie distant relève d'une approche beaucoup plus complexe que dans le cas du risque direct. Cette approche doit être conduite par un bureau d'étude spécialisé.

Avec un taux de pénétration du GNC de 100 %¹⁶ au sein des bus et une proportion de bus de 1,8 % dans le trafic, les taux de survenance d'un feu torche ou d'une explosion de nuage sont respectivement 1700 et 25 000 fois plus faibles que la fréquence de survenue d'un incendie de véhicule classique de tout type.

3.1.4 Le cas des véhicules fonctionnant à l'hydrogène comprimé

Risques directs

Les taux de survenance sont calculés à l'aide des formules suivantes, dont les paramètres sont $\tau_{\text{type-veh}}$ (taux du type de véhicule considéré dans le trafic : véhicule léger, véhicule utilitaire léger, poids lourds, bus, etc) et $\tau_{\text{pénétration}}$ (taux de pénétration des véhicules à l'hydrogène pour le type de véhicule retenu) :

- taux de survenance d'un feu torche suite à un choc ou une défaillance thermo-fusible consécutive à un problème survenu lors du remplissage du réservoir (T_{FT}) :
$$T_{\text{FT}} = 0,741 \times \tau_{\text{type-veh}} \times \tau_{\text{pénétration}} \text{ événements pour } 10^8 \text{ véh} \cdot \text{km} ;$$

14. Quels que soient les événements redoutés, les fréquences se déduisent de la même façon des taux de survenance.

15. La valeur de 2 % est largement majorante, car elle est supérieure au taux de pénétration de l'ensemble des nouvelles énergies de propulsion à la date de publication du présent document.

16. Un taux de pénétration de 100 % a été choisi pour les bus, alors qu'il a été fait l'hypothèse d'un taux de 2 % pour l'ensemble des véhicules dans le cadre de l'étude du risque direct. Ce choix s'explique par les obligations en termes de renouvellement des bus par des bus fonctionnant avec des énergies alternatives qui vont conduire, dans un avenir proche, à une proportion significative de bus GNC dans les flottes (probablement supérieure à 50 % à certains endroits). La valeur est conservatoire afin de couvrir l'ensemble des cas de figure possibles.

- taux de survenance d'une explosion de nuage suite à un choc ou à une défaillance du thermo-fusible consécutive à un problème survenu lors du remplissage du réservoir (T_{VCE}) :

$$T_{VCE} = 0,0823 \times \tau_{\text{type-véh}} \times \tau_{\text{pénétration}} \text{ événements pour } 10^8 \text{ véh} \cdot \text{km} ;$$

- taux de survenance d'une rupture de réservoir suite à incendie du véhicule ($T_{RUPTURE}$) :

$$T_{RUPTURE} = 10^{-3} \times \tau_{\text{type-véh}} \times \tau_{\text{pénétration}} \times \tau_{\text{incendie}} \text{ événements pour } 10^8 \text{ véh} \cdot \text{km}.$$

À titre d'illustration, pour un taux de véhicules légers de 95 % dans le trafic, un taux de pénétration de 2 % de la propulsion à l'hydrogène au sein des véhicules légers et le taux d'incendie rappelé au 3.1.1, le taux de survenance d'un feu torche sur un véhicule léger est environ 70 fois plus faible que le taux de survenance d'un incendie de véhicule classique de tout type. Pour l'explosion de nuage et la rupture de réservoir, ce ratio est respectivement de 640 et 26 000.

Risques indirects

Comme pour les véhicules au GNC, aucun risque additionnel indirect provoqué par les véhicules légers et les poids lourds à hydrogène n'est à prendre en compte (cf. 3.2.1). Seuls sont donc traités les risques additionnels indirects provoqués par les bus à hydrogène.

Les taux de survenance d'un feu torche ou de l'explosion d'un nuage déclenché par les fumées d'un incendie distant pour un bus à hydrogène sont identiques à ceux des bus au GNC (cf. 3.1.3).

Si l'on retient un taux de pénétration des bus à hydrogène de 100 %¹⁷ et une proportion de bus de 1,8 % dans le trafic, les taux de survenance d'un feu torche ou d'une explosion de nuage sont respectivement 1700 et 37 000 fois plus faibles que le taux de survenance d'un incendie de véhicule classique de tout type.

Dans le cas du feu torche, le phénomène est susceptible d'impacter les usagers si les thermo-fusibles sont orientés horizontalement et vers le côté droit (ou le côté gauche) si le bus est sur la voie de droite (ou sur la voie de gauche). En effet, la flamme d'hydrogène rayonne peu en comparaison de celle du GNC. En l'absence de réflexion sur le piédroit, la zone d'effets létaux de la flamme reste ainsi cantonnée au-dessus des usagers (les réservoirs des bus sont sur le toit). En revanche, s'il y a une réflexion sur la paroi, l'impact réfléchit la flamme dans toutes les directions, avec pour conséquence la possible présence d'effets létaux à hauteur d'homme (cf. Figure 14).

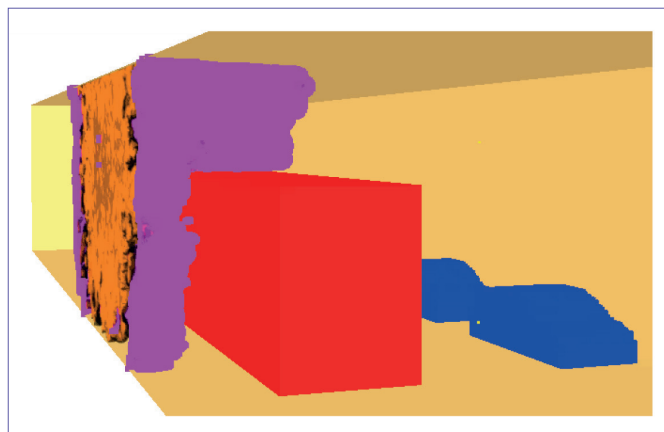


Figure 14 : Feu torche orienté vers la droite en cas de bus sur la voie de droite (orange : flamme, rose : iso surface à 120°C)

3.1.5 Le cas des poids lourds fonctionnant au GNL

Risque direct

Les taux de survenance sont calculés à l'aide des formules suivantes, dont les paramètres sont τ_{PL} et $\tau_{\text{pénétration}}$ (taux de pénétration des poids lourds au GNL) :

- taux de survenance d'un feu torche suite à un choc ou une défaillance de la soupape consécutive à un problème survenu lors du remplissage du réservoir (T_{FT}) :

$$T_{FT} = 0,041 \times \tau_{PL} \times \tau_{\text{pénétration}} \text{ événements pour } 10^8 \text{ véh} \cdot \text{km} ;$$

- taux de survenance d'une explosion de nuage suite à un choc ou à une défaillance de la consécutive à un problème survenu lors du remplissage de la soupape (T_{VCE}) :

$$T_{VCE} = 0,1558 \times \tau_{PL} \times \tau_{\text{pénétration}} \text{ événements pour } 10^8 \text{ véh} \cdot \text{km} ;$$

- taux de survenance d'une rupture de réservoir suite à incendie du véhicule ($T_{RUPTURE}$) :

$$T_{RUPTURE} = 10^{-4} \times \tau_{PL} \times \tau_{\text{pénétration}} \times \tau_{\text{incendie}} \text{ événements pour } 10^8 \text{ véh} \cdot \text{km}.$$

À titre d'illustration, pour un taux de poids lourds de 5 % dans le trafic, un taux de pénétration de 2 % du GNL¹⁸ au sein des poids lourds et le taux d'incendie rappelé au 3.1.1, le taux de survenance d'un feu torche est environ 24 000 fois plus faible que le taux de survenance d'un incendie de véhicule classique de tout type. Pour l'explosion de nuage et la rupture de réservoir, ce ratio est respectivement de 6 400 et 67 000.

17. Un taux de pénétration de 100 % a été choisi pour les bus, alors qu'il a été fait l'hypothèse d'un taux de 2 % pour l'ensemble des véhicules dans le cadre de l'étude du risque direct. Ce choix s'explique par les obligations en termes de renouvellement des bus par des bus fonctionnant avec des énergies alternatives. Cette obligation pourrait conduire, à terme, à une proportion significative de bus hydrogène dans les flottes, l'usage de cette énergie du puits à la roue étant susceptible à l'avenir de devenir très faiblement émettrice de gaz à effet de serre. La valeur est conservatoire afin de couvrir l'ensemble des cas de figure possibles.

18. La valeur de 2 % est largement majorante, car elle est supérieure au taux de pénétration de l'ensemble des nouvelles énergies de propulsion à la date de publication du présent document.

Risque indirect

Tout comme pour le GNC et l'hydrogène, aucun risque additionnel indirect provoqué par les poids lourds GNL n'est à prendre en compte (cf. 3.2.1).

Risque direct : comparaison entre événements redoutés spécifiques au gaz et incendie sur tout type de véhicules en termes de taux de survenance (taux de pénétration du gaz de 2 %)			
ERS / TYPE DE VÉHICULES	Véhicule léger fonctionnant au GNC	Véhicule léger fonctionnant à l'hydrogène	Poids lourd fonctionnant au GNL
Feu torche	Taux 640 fois plus faible	Taux 70 fois plus faible	Taux 24 000 fois plus faible
Explosion de nuage	Taux 140 fois plus faible	Taux 640 fois plus faible	Taux 6 400 fois plus faible
Rupture de réservoir	Taux 26 000 fois plus faible	Taux 26 000 fois plus faible	Taux 67 000 fois plus faible

3.2 LES CONSÉQUENCES POUR LA SÉCURITÉ DES USAGERS

L'analyse des conséquences pour les usagers est principalement basée sur les résultats des travaux de recherche qui ont été menés par le CETU et l'INERIS [7] et [8].

3.2.1 Les principales hypothèses et les paramètres d'influence

La caractérisation des conséquences

Pour les caractériser, les conséquences directes des événements redoutés sont exprimées en nombre d'usagers soumis aux effets létaux significatifs tels que définis dans l'arrêté du 29 septembre 2005 relatif aux installations classées pour la protection de l'environnement.

Par exemple, pour les effets de surpression consécutifs à une explosion, le seuil des effets létaux significatifs est de 200 mbar et délimite la zone des dangers très graves pour la vie humaine (zone mentionnée à l'article L.515-16 du code de l'environnement).

Il est important de noter que lorsqu'un usager est soumis à ces effets, cela signifie qu'il y a un risque non négligeable qu'il décède, sans qu'il soit toutefois certain que cela n'arrive. Ce risque dépend en effet de trop nombreux facteurs pour pouvoir être évalué avec certitude : âge de la personne, état de santé, projection éventuelle de débris, etc.

La formalisation des résultats

L'aire des effets létaux significatifs est exprimée en mètres et est toujours centrée sur le véhicule à énergie alternative. Une aire d'effets létaux significatifs de 50 mètres signifie donc que des effets létaux significatifs existent sur une distance de 25 mètres de part et d'autre du véhicule à énergie alternative.

Les usagers soumis aux effets létaux significatifs sont ceux présents à l'intérieur de l'ouvrage et dans l'aire d'effets. Les hypothèses utilisées pour estimer le nombre de ces usagers sont celles du fascicule 4 du guide des dossiers de sécurité, c'est-à-dire une valeur de 10 mètres de pare-choc avant à pare-choc avant pour estimer dans un premier temps le nombre de véhicules présents dans le tunnel, puis 1,5 personnes par véhicule pour estimer dans un second temps le nombre personnes à partir du nombre de véhicules.

Il faut noter que **les résultats présentés dans les chapitres suivants pour les véhicules légers et les poids lourds, en cas d'explosion de nuage (VCE) ou de rupture de réservoir, correspondent au cas où il n'y a pas de bus dans l'aire d'effet de l'événement redouté.** Si un bus est présent dans l'aire d'effet, les passagers du bus sont à ajouter.

Plusieurs configurations ont été étudiées en faisant varier différents paramètres : le caractère unidirectionnel ou bidirectionnel, la présence ou non de congestion, etc. Les résultats sont donc présentés sous forme d'intervalles. Leur borne haute correspond au cas le plus critique, qui est celui d'un tunnel à deux voies par tube avec trafic congestionné.

La représentativité des résultats

Les intervalles de résultat ont été calculés à partir de modélisations représentant un tunnel de 60 m² de section (10 m de largeur et 6 m de hauteur). Ils sont représentatifs et majorants des configurations classiques de tunnels comportant deux voies de circulation.

Ces intervalles donnent ainsi une idée générale des conséquences dans les cas les plus courants. En cas de tunnel présentant des géométries très différentes de celles du cas étudié, une évaluation spécifique doit donc être menée.

Les résultats reposent bien sûr sur l'état des connaissances existantes au moment de l'étude CETU - INERIS [7] et [8].

L'impact du courant d'air sur les événements redoutés liés au gaz

Pour les événements redoutés que sont les feux torches ou les éclatements de réservoir, les études menées par le CETU et l'INERIS ont montré que le courant d'air naturel ou créé mécaniquement par la ventilation n'était pas de nature à modifier sensiblement les aires d'effets létaux significatifs.

Pour l'événement redouté que constitue l'explosion de nuage, l'impact du courant d'air sur la formation du nuage dépend de multiples facteurs (section du tunnel, proximité des parois, etc.). Des recherches sont en cours pour quantifier la diminution de la masse inflammable sous l'effet d'un courant d'air. Cette diminution, si elle s'avérait significative, montrerait que les conséquences d'une explosion de nuage de gaz sont réduites si un courant d'air est présent en tunnel.

L'impact du type de véhicules sur les résultats concernant le gaz comprimé

Concernant l'explosion des nuages de gaz, il a été considéré que le type de véhicule n'avait pas d'impact sur l'aire des effets létaux significatifs.

En effet, la masse inflammable dépend de la pression dans le réservoir et du diamètre du thermo-fusible, qui sont supposés identiques pour tous les véhicules. En conséquence, une masse plus importante de gaz entraînerait uniquement une persistance accrue du nuage dans l'environnement. Il y aurait ainsi peu de différences en termes de conséquences entre deux réservoirs de capacité différente.

Une ouverture simultanée des thermo-fusibles de deux réservoirs suite à un choc ou un dysfonctionnement est par ailleurs extrêmement improbable [7] et [8] et n'a donc pas été considérée.

Concernant l'éclatement de réservoirs de gaz comprimés, il a été également considéré que le type de véhicule n'avait pas d'impact sur l'aire des effets létaux significatifs, dans la mesure où seul l'éclatement d'un réservoir a été pris en compte.

En effet, lorsqu'ont été conduites les études ayant permis d'évaluer les conséquences, la masse de gaz des réservoirs de véhicules légers ne différait pas suffisamment de celle des réservoirs des poids lourds pour impacter les résultats.

Par ailleurs, si plusieurs réservoirs sont présents sur un véhicule, les éclatements ne sont pas concomitants mais successifs, entraînant la répétition de la même aire d'effets létaux significatifs et non son augmentation.

Le délai avant éclatement des réservoirs de gaz

Le délai avant éclatement des réservoirs de gaz en cas d'agression thermique maximale¹⁹ est de 8 à 20 minutes pour l'hydrogène et le GNC (cf. 2.2.3 et 2.3.3). Il serait de 15 à 20 minutes pour le GNL lorsqu'il est stocké à 10 bars et - 130°C, mais pourrait être beaucoup plus court – quelques minutes – lorsqu'il est stocké à 1,1 bar et - 160°C. Des investigations sont encore nécessaires sur ce dernier point.

À ces délais s'ajoute le temps nécessaire pour que l'incendie s'étende sur l'ensemble du réservoir. Cette durée est sans doute très variable, car elle dépend de nombreux facteurs (localisation du départ du feu, cinétique de propagation, etc.).

Les résultats exprimés en nombre de personnes soumises aux effets létaux sont donc à interpréter avec prudence, car sensibles à la fois au délai avant éclatement et au délai de réaction et d'auto-évacuation des usagers.

Un éclatement de réservoir provoqué par les fumées chaudes d'un incendie distant – risque indirect – ne peut advenir qu'après environ trois heures de présence du réservoir dans ces fumées.

Le risque indirect pour les véhicules fonctionnant au gaz : un enjeu uniquement pour les bus

Le risque indirect que constitue un feu torche ou une explosion de nuage consécutif aux fumées chaudes d'un incendie distant n'est pas à prendre en compte pour les véhicules légers ou les poids lourds.

En effet, sur ce type de véhicules, les réservoirs sont positionnés en partie basse. Compte tenu de ce positionnement, pour que les températures provoquent l'ouverture du thermo-fusible et le relâchement du gaz, il faut un incendie très développé qui ne serait pas compatible avec la survie des usagers. Le feu torche ou l'explosion de nuage qui adviendrait alors n'aurait ainsi pas de conséquence supplémentaire sur les personnes.

19. C'est-à-dire correspondant à un cas de figure où l'ensemble du réservoir est pris dans l'incendie du véhicule lui-même.

Ces deux événements redoutés sont en revanche à prendre en compte dans le cas des bus, car sur ce type de véhicule, les réservoirs sont positionnés dans la plupart des cas en partie haute. Le thermo-fusible est alors dans une zone où les températures peuvent suffire à provoquer son ouverture (à 110°C), alors qu'en partie basse, des usagers peuvent encore être présents car les températures y sont plus faibles et donc encore supportables.

Comme indiqué précédemment, quel que soit le type de véhicule, la rupture d'un réservoir exposé à des fumées chaudes ne se produit qu'après plusieurs heures. Cette rupture intervient donc bien après l'évacuation des usagers, ou alors à un moment où les conditions ambiantes ne sont plus compatibles avec leur survie. La rupture de réservoir n'est donc jamais à prendre en compte.

Finalement, pour un bus fonctionnant au gaz, les seuls risques indirects pour les usagers sont le feu torche et l'explosion de nuage.

3.2.2 Le cas des véhicules fonctionnant à l'électricité stockée en batterie

Pour les raisons données au § 2.1, seules les batteries Lithium-ion ont été prises en compte, en excluant notamment celles contenant du Lithium métal.

Le seul risque pour les usagers que représentent les véhicules qui sont équipés de batteries Lithium-ion est celui d'un incendie, soit initié par un emballement thermique, soit initié par une autre cause et suivi d'un emballement thermique.

L'emballlement de la batterie est susceptible d'affecter les caractéristiques de l'incendie, mais sans modifier suffisamment sa puissance pour que cela ait un impact significatif sur la sécurité des usagers, en tout cas lorsque la capacité des batteries ne dépasse pas 80 kWh²⁰. En outre, ce phénomène particulier interviendrait environ 10 minutes après l'atteinte d'une température de 150°C (cf. 2.1.3) soit bien après le début de l'évacuation des usagers et lorsque les conditions à proximité du véhicule ne sont plus compatibles avec leur survie.

Par ailleurs, les différents essais et études réalisés montrent qu'en cas d'incendie, les émissions toxiques des véhicules classiques et des véhicules électriques ne présentent pas de différence significative, même si l'on tient compte de l'acide fluorhydrique émis par la vaporisation de l'électrolyte fluoré (LiPF₆) des batteries. Les émissions toxiques spécifiques aux véhicules électriques restent ainsi faibles par rapport à celles qui sont communes aux deux types de véhicules (plastiques, sièges, composants de climatisation, etc.).

Enfin, l'éjection par une batterie en feu d'éléments capables de percer son capotage et de traverser la carrosserie du véhicule n'est principalement possible qu'avec les batteries à cellules cylindriques. Ces batteries sont toutefois rarement utilisées par les constructeurs et, même dans ce cas-là, les projections n'auraient qu'un impact limité sur les usagers.



Figure 15 : Batteries sur un bus électrique

En résumé, du point de vue des conséquences pour les usagers, l'incendie d'un véhicule électrique ne présente pas de différence significative par rapport à celui d'un véhicule classique.

3.2.3 Le cas des véhicules fonctionnant au GNC

Les résultats présentés dans ce chapitre ont été établis sur la base de réservoirs contenant 9 kg de GNC.

Comme expliqué au § 3.2.1, le type de véhicule n'a pas d'incidence significative sur les résultats.



Figure 16 : Réservoirs GNC sur un bus

20. Des batteries de capacité supérieure n'existaient pas sur les véhicules lorsqu'ont été conduites les études sur lesquelles s'appuie ce document ; des investigations supplémentaires sont requises pour vérifier que cette conclusion reste valide pour des batteries de puissance supérieure.

Risque direct

L'incendie d'un véhicule alimenté au GNC ne présente pas de différence significative par rapport à celui d'un véhicule classique si ses thermo-fusibles fonctionnent correctement.

En effet, d'une part l'impact du feu torche sur la cinétique de l'incendie et sa puissance n'est pas significatif, et d'autre part ce phénomène survient lorsque la température atteint 110°C au niveau des thermo-fusibles, donc lorsque

les conditions à proximité du véhicule compromettent déjà la survie des usagers²¹.

Dans des conditions très particulières de localisation du début de l'incendie, les conséquences pourraient cependant être similaires à celles provoquées par un feu torche consécutif à un choc ou une défaillance résultant d'un problème survenu lors du remplissage du réservoir. Ce sera par exemple le cas si l'incendie débute à proximité du thermo-fusible, provoquant son activation alors que les conditions à hauteur d'homme sont encore compatibles avec la survie.

Événement redouté	Type de véhicules	Aire des effets létaux significatifs	Nombre d'usagers soumis aux effets létaux significatifs pour la configuration classique de référence
Feu torche suite à un choc ou à une défaillance lors du remplissage	Véhicule léger	Voisinage du véhicule concerné	Environ 1,5
	Poids lourd		
	Bus		Entre aucun et la totalité des passagers du bus
Explosion de nuage suite à un choc ou à une défaillance lors du remplissage	Véhicule léger	5 à 20 m centrés sur le véhicule	2 à 10
	Poids lourd		
	Bus		2 à 10 ainsi que la totalité des passagers du bus
Rupture de réservoir suite à un incendie du véhicule	Véhicule léger	15 à 30 m centrés sur le véhicule	5 à 15
	Poids lourd		
	Bus		5 à 15 ainsi que la totalité des passagers du bus ²²

Tableau 1 : Estimation des conséquences des événements redoutés spécifiques aux véhicules GNC

Pour certains petits camions dotés de réservoirs de 70 litres, l'aire des effets létaux significatifs d'une rupture de réservoir peut aller jusqu'à 60 mètres centrés sur le véhicule, soit un nombre d'usagers soumis à ces effets compris entre 10 et 20.

Risques indirects

Aucun risque additionnel indirect provoqué par les véhicules légers ou les poids lourds au GNC n'étant à prendre en compte (cf. 3.2.1), seuls les cas du feu torche et de l'explosion de nuage advenant sur un bus sont ici retenus.

Pour un bus GNC atteint par les fumées chaudes d'un incendie distant :

- en cas de survenance d'un feu torche, des usagers sont soumis aux effets létaux significatifs durant la phase d'évacuation ;
- en cas de survenance d'une explosion de nuage, le nombre d'usagers soumis aux effets létaux significatifs est la somme du nombre d'usagers qui occupaient d'autres véhicules (compris entre 2 et 10 selon les hypothèses et résultats de l'étude CETU-INERIS) et du nombre de passagers présents dans le bus.

21. Dans la plupart des cas observés à l'air libre, le feu torche a démarré alors que l'incendie du véhicule était déjà fortement développé ; le confinement de la chaleur en tunnel pourrait toutefois accélérer cette cinétique.

22. Le risque qu'une rupture de réservoir ait un impact sur les usagers est à relativiser encore davantage que pour les autres types de véhicules. En effet, les réservoirs étant situés en partie haute (sur le toit ou à l'arrière), en cas de départ de feu en partie basse, le délai de propagation jusqu'au réservoir risque d'être conséquent et s'ajoute au délai de rupture (cf. 3.2.1).

3.2.4 Le cas des véhicules fonctionnant à l'hydrogène comprimé

Les résultats et commentaires présentés dans ce chapitre ont été établis sur la base de réservoirs contenant 3,33 kg d'hydrogène. Comme expliqué au § 3.2.1, le type de véhicule n'a pas d'incidence significative sur les résultats.

Risque direct

L'incendie d'un véhicule alimenté à l'hydrogène ne présente pas de différence significative par rapport à un véhicule classique si ses thermo-fusibles fonctionnent correctement.

En effet, d'une part l'impact du feu torche sur la cinétique de l'incendie et sa puissance n'est pas significatif, et d'autre part ce phénomène survient lorsque la température atteint 110°C au niveau des thermo-fusibles, donc lorsque les conditions à proximité du véhicule compromettent déjà la survie des usagers.

Cependant, dans des conditions très particulières de localisation du début de l'incendie, notamment sur les bus, les conséquences pourraient être similaires à celles provoquées par un feu torche résultant d'un choc ou d'une défaillance consécutive à un problème survenu lors du remplissage du réservoir (cf. ci-dessous).

Événement redouté	Type de véhicules	Aire des effets létaux significatifs	Nombre d'usagers soumis aux effets létaux significatifs pour la configuration classique de référence
Feu torche suite à un choc ou à une défaillance lors du remplissage	Véhicule léger	Voisinage du véhicule concerné	Environ 1,5
	Poids lourd		
	Bus		Thermo-fusibles horizontaux et réservoirs pressurisés à 700 bars : entre aucun et tous les passagers ; thermo-fusibles verticaux : aucun
Explosion de nuage suite à un choc ou à une défaillance lors du remplissage	Véhicule léger	80 m centrés sur le véhicule	15 à 25
	Poids lourd		
	Bus		15 à 25 ainsi que la totalité des passagers du bus
Rupture de réservoir suite à un incendie du véhicule	Véhicule léger	80 m centrés sur le véhicule	15 à 25
	Poids lourd		
	Bus		15 à 25 ainsi que la totalité des passagers du bus ²³

Tableau 2 : Estimation des conséquences des événements redoutés spécifiques aux véhicules fonctionnant à l'hydrogène comprimé

Risques indirects

Aucun risque additionnel indirect provoqué par les véhicules légers ou les poids lourds à hydrogène n'étant à prendre en compte (cf. 3.2.1), seuls les cas du feu torche et de l'explosion de nuage advenant sur un bus sont ici retenus.

Pour un bus à hydrogène atteint par les fumées chaudes d'un incendie distant :

- en cas de survenance d'un feu torche, des usagers sont soumis aux effets létaux significatifs uniquement

- si le bus a des réservoirs pressurisés à 700 bars, des thermo-fusibles orientés horizontalement vers la droite (respectivement vers la gauche) et est positionné sur la voie de droite (respectivement la voie la plus à gauche), à proximité du piédroit (cf. 3.1.4). Ce nombre est au maximum égal au nombre de passagers du bus ;
- en cas de survenance d'une explosion de nuage, le nombre d'usagers soumis aux effets létaux significatifs est la somme du nombre d'usagers impactés qui occupaient d'autres véhicules (compris entre 15 et 25 selon les hypothèses et résultats de l'étude CETU-INERIS) et du nombre de passagers présents dans le bus.

23. Le délai de propagation d'un feu en partie basse jusqu'au réservoir en partie haute s'ajoute au délai de rupture et doit conduire à relativiser encore davantage le risque que pour les autres types de véhicules.

3.2.5 Le cas des poids lourds fonctionnant au GNL

Les résultats présentés dans ce chapitre ont été établis sur la base de réservoirs contenant 150 kg de gaz naturel liquide pour les poids lourds. Comme indiqué au 2.4, aucun modèle de véhicule léger et de bus n'a été retenu.

Risque direct

L'incendie d'un poids lourd alimenté au GNL ne présente généralement pas de différence significative par rapport à celui d'un poids lourd classique si ses soupapes fonctionnent correctement.

En effet, d'une part l'impact du feu torche consécutif à l'ouverture d'une soupape est négligeable sur la cinétique et la puissance de l'incendie, et d'autre part ce phénomène survient lorsque

la pression dans le réservoir atteint 16 bars, ce qui signifie que les températures à proximité du véhicule sont telles qu'elles compromettent déjà la survie des usagers.



Figure 17 : Remplissage d'un réservoir de poids lourd GNL

Événement redouté	Type de véhicules	Aire des effets létaux significatifs	Nombre d'usagers soumis aux effets létaux significatifs pour la configuration classique de référence
Feu torche suite à un choc ou à une défaillance lors du remplissage	Poids lourd	Voisinage du véhicule concerné	Environ 1,5
Explosion de nuage suite à un choc ou à une défaillance lors du remplissage	Poids lourd	Voisinage du véhicule concerné	Environ 1,5
Rupture de réservoir puis BLEVE²⁴ suite à un incendie du véhicule ²⁵	Poids lourd	80 m centrés sur le véhicule	15 à 25
		750 m centrés sur le véhicule	50 ²⁶ à 225

Tableau 3 : Estimation des conséquences des événements redoutés spécifiques aux poids lourds

Risques indirects

La propulsion au GNL ne concernait que les poids lourds au moment de l'étude CETU-INERIS. Or, le risque indirect n'est un enjeu que pour les bus ou les autocars (cf. 3.2.1). L'étude des risques indirects pour les véhicules GNL n'a donc pas été développée ici.

Synthèse des conséquences des événements redoutés spécifiques aux véhicules légers fonctionnant au GNC ou à l'hydrogène et aux poids lourds fonctionnant au GNL

Aire des effets létaux significatifs	Véhicule léger fonctionnant au GNC	Véhicule léger fonctionnant à l'hydrogène	Poids lourd fonctionnant au GNL
Feu torche	Voisinage du véhicule	Voisinage du véhicule	Voisinage du véhicule
Explosion de nuage	5 à 20 m	80 m	Voisinage du véhicule
Rupture de réservoir	15 à 30 m	80 m	750 m

24. BLEVE : Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion.

25. Les effets thermiques sont prépondérants pour ce phénomène à la différence des éclatements de réservoir d'hydrogène ou de GNC pour lesquels ce sont les effets de pression qui prédominent.

26. Dans ce cas particulier, la borne basse correspond à une situation plausible où la file de véhicules derrière le véhicule à énergie alternative n'est que d'environ 150 m.

LES CONSÉQUENCES POUR LES STRUCTURES ET LES ÉQUIPEMENTS DES TUNNELS

3.3.1 Les conséquences d'un emballement thermique

L'emballement thermique d'une batterie de véhicule électrique a pour conséquence un incendie dont les caractéristiques sont semblables à celles du feu d'un véhicule classique.

Les conséquences d'un emballement thermique sur les structures et équipements d'un tunnel sont donc les mêmes que celles des véhicules classiques.

Le développement des véhicules électriques n'est donc pas à lui seul de nature à remettre en cause les règles existantes en matière de résistance au feu des structures et de tenue à la chaleur des équipements.

3.3.2 Les conséquences d'un feu torche

Le feu torche est un phénomène bref et localisé. Il ne devrait donc pas provoquer à lui seul de dommage grave aux structures. Dans la grande majorité des cas, il se produit en effet sur un véhicule déjà en feu et ne provoque pas de modification significative de la chaleur totale dégagée par l'incendie, qui est le premier déterminant de l'impact d'un incendie sur les structures.

Le même raisonnement peut être appliqué aux équipements, qui pourraient subir très localement les dommages d'un feu torche, mais pas au-delà.

3.3.3 Les conséquences des phénomènes explosifs

Les phénomènes explosifs peuvent avoir un impact sur les structures et les équipements, avec des conséquences pour la sécurité des usagers, qui sont prises en compte dans la caractérisation des effets létaux présentée au § 3.2.

Ces effets incluent en effet les projections d'objets ou la chute d'éléments structurels.

Il faut toutefois préciser que compte tenu des connaissances et des outils actuels, l'évaluation des conséquences présentée dans ce document reste sommaire et serait à préciser dans le contexte particulier des tunnels. Les conséquences à plus long terme des explosions sur la pérennité des ouvrages restent de plus des sujets d'interrogation et de recherche active. Pour ces deux sujets, les résultats dépendront certainement du type de structure : tunnel creusé ou tranchée couverte, structure principale ou secondaire.

En matière d'équipements, la possibilité d'une perte partielle ou totale de certains d'entre eux sous l'effet d'un incendie est admise et prise en compte lors de la conception, à travers la mise en place de redondances et de cantonnements. Les ordres de grandeur des distances d'effets des phénomènes explosifs considérés avec les nouvelles énergies de propulsion ne semblent pas de nature à remettre en cause les règles appliquées aujourd'hui, telles que les longueurs de cantonnement retenues pour certains systèmes d'équipements. En outre, les équipements les plus vitaux tels que les alimentations électriques principales se trouvent dans des locaux annexes, a priori protégés des effets immédiats d'une explosion en tunnel.

NOUVEAUX ENJEUX POUR LES ACTEURS DE LA SÉCURITÉ

4.1

LES NOUVEAUX ENJEUX POUR LES GESTIONNAIRES ET LES EXPLOITANTS DE TUNNELS ROUTIERS

La circulation des véhicules à énergie alternative en tunnel routier introduit de nouveaux risques dans ces ouvrages (cf. § 2 et 3).

Au même titre que les accidents, les incendies et les risques d'explosion de transports de marchandises dangereuses, ces risques doivent être pris en compte dans le cadre de la démarche de sécurité qui est imposée aux gestionnaires par la réglementation française. Cette démarche s'appuie sur le dossier de sécurité, notamment l'étude de trafic et l'étude spécifique des dangers qui permettent aux parties prenantes de mieux appréhender les risques et la façon d'y faire face. Sa mise en pratique dans l'exploitation doit permettre de détecter et d'identifier les événements redoutés, de les prévenir dans la mesure du possible et de minimiser leurs conséquences sur les personnes, l'ouvrage et l'environnement. Cette déclinaison opérationnelle requiert que les personnels d'exploitation et les services d'information soient formés et entraînés à collaborer.

4.1.1 L'évaluation du nombre de véhicules à énergie alternative empruntant un tunnel donné

Afin d'évaluer le plus précisément possible les conséquences du développement des nouveaux modes de propulsion sur le niveau de sécurité d'un tunnel donné, son niveau de fréquentation par les véhicules à énergie alternative doit être estimé.

Cette connaissance a pour but, en premier lieu, de détecter d'éventuels enjeux majeurs propres au tunnel, par exemple le passage régulier de transports en commun à énergie alternative.

La connaissance de la part des véhicules utilisant chaque nouvelle énergie est en outre une donnée d'entrée nécessaire au calcul des fréquences des événements redoutés spécifiques. Ces fréquences sont indispensables pour intégrer les nouveaux modes de propulsion aux études spécifiques des dangers.

L'estimation de la part des véhicules à énergie alternative empruntant un tunnel en particulier représente toutefois une réelle difficulté, car il n'existe pas de moyen simple de comptage de ces véhicules, qui de surcroît permette de les distinguer par catégorie (cf. 4.1.3). Notamment, les comptages visuels peuvent être a priori exclus, du simple fait que les véhicules à énergie alternative ne portent pas – ou très rarement – des signes distinctifs.

À défaut de données spécifiques au tunnel, il est donc toujours possible d'utiliser des données nationales pour estimer la part de ces véhicules dans le trafic, mais la distinction par type de véhicule ne sera plus assurée et l'incertitude introduite dans le calcul des fréquences plus forte.

En conclusion, l'arrivée des nouveaux modes de propulsion impose d'adapter les études de trafic réalisées dans le cadre de l'élaboration des dossiers de sécurité. Il s'agit de connaître avec la meilleure précision possible la part de véhicules à énergie alternative empruntant un tunnel donné, en particulier pour évaluer les fréquences de leurs événements redoutés dans l'étude spécifique des dangers. La part de véhicules à énergie alternative dans le trafic étant en pleine croissance, il sera opportun de la vérifier régulièrement, au moins tous les six ans dans le cadre de l'actualisation du dossier de sécurité.

4.1.2 La prise en compte des véhicules à énergie alternative dans l'étude spécifique des dangers

L'étude spécifique des dangers est une pièce essentielle du dossier de sécurité. Elle expose les dangers susceptibles de se produire dans un tunnel donné, leurs conséquences, et les mesures propres à réduire les risques. Elle contribue ainsi significativement à l'évaluation du niveau de sécurité.

Si, en l'état des connaissances actuelles, l'incendie d'un véhicule à énergie alternative ne présente généralement pas d'enjeu particulier par rapport à ceux des véhicules classiques (cf. 3.2), de nouveaux événements redoutés – par exemple le feu torche – doivent être considérés, et la méthodologie de réalisation des études spécifiques des dangers doit donc être adaptée. Les données indispensables pour conduire l'étude spécifique des dangers intégrant les véhicules à énergie alternative sont la fréquence prévisionnelle et la gravité des événements redoutés liés à chaque type d'énergie. Il n'existe pas, à la date de parution de ce document, une base partagée de données ni une méthode permettant d'obtenir ces valeurs, mais les informations des chapitres 3.1 et 3.2 constituent une première source sur laquelle les auteurs de ces études peuvent s'appuyer.

Compte tenu des évolutions technologiques permanentes qui affectent les nouveaux modes de propulsion et qui peuvent modifier la nature et l'ampleur des phénomènes dangereux, une telle base devrait vraisemblablement être actualisée régulièrement.

4.1.3 L'identification des véhicules à énergie alternative impliqués dans un événement

L'accident ou l'incendie d'un véhicule à énergie alternative est susceptible d'entraîner des risques particuliers pour les personnes – usagers et services de secours – et de complexifier l'action des parties prenantes, notamment de l'exploitant et des services de secours. L'identification du mode de propulsion alternatif constitue donc un élément-clé pour l'aide à la décision des parties prenantes.

Ainsi, lorsqu'un tunnel est surveillé par un poste de contrôle, il serait utile que l'exploitant puisse informer rapidement les pompiers de la présence d'un véhicule à énergie alternative, afin qu'ils adoptent une stratégie opérationnelle adaptée.

À la date de publication de ce document, il n'existe toutefois pas de dispositif simple – signalisation spécifique obligatoire apposée sur les véhicules et pouvant être reconnue par analyse d'image, lecture automatisée de plaques d'immatriculation, etc. – permettant d'identifier ces véhicules. Des études doivent être menées pour identifier les technologies qui pourraient permettre cette reconnaissance et en évaluer les performances, la fiabilité, la maintenabilité et le coût.

4.1.4 Les moyens de surveillance et de détection pour anticiper les événements redoutés spécifiques

Que les événements redoutés spécifiques adviennent en circulation courante ou suite à un accident ou un incendie, la détection de leurs signaux précurseurs est un moyen de les anticiper et d'aider à en réduire les conséquences.

Il s'agirait, par exemple, de pouvoir détecter une élévation de température de la batterie d'un véhicule électrique en circulation, précurseur d'un possible emballement thermique, ou la fuite de gaz sur un véhicule accidenté, précurseur d'une possible explosion de nuage.

Le développement des équipements de surveillance et de détection permettant de remplir cette fonction n'est pas encore achevé à ce jour. Les équipements qui pourraient être utilisés pour cela doivent être recensés, puis des études seront à mener afin d'évaluer leurs performances, leur fiabilité, leur maintenabilité et leur coût. Il pourrait par exemple s'agir de caméras thermiques couplées à des analyseurs d'images afin de détecter les élévations de température, ou de l'analyse en continu de la composition de l'air afin de détecter les fuites de gaz.

4.1.5 La prévention et la gestion des conséquences pour l'utilisateur

Les particularités des événements redoutés spécifiques aux nouvelles énergies de propulsion, par exemple la cinétique très rapide des explosions, posent la question d'enrichir ou d'adapter les modalités de prévention des incidents et la façon de les gérer.

En matière de prévention, des études sont encore nécessaires pour évaluer le nouveau cadre d'emploi que pourraient avoir les équipements déjà utilisés pour détecter les événements redoutés classiques ou en limiter les conséquences. Par exemple, la capacité d'un système de désenfumage à réduire la masse inflammable d'un nuage de gaz et, de ce fait les conséquences de son explosion, doit être examinée. Cette capacité dépend sans doute du type de système de ventilation et de la géométrie du tunnel. Si un effet significatif était avéré, il s'agirait ensuite de définir une stratégie adaptée au risque, précisant notamment les conditions dans lesquelles la ventilation doit être activée.

En matière de gestion des événements, certains événements redoutés spécifiques consécutifs à un feu ont une aire d'effets et un délai de déclenchement apparemment compatibles avec les stratégies déjà appliquées en cas d'incendie, notamment pour la fermeture et l'évacuation des usagers (par exemple pour l'éclatement d'un réservoir de gaz – cf. 3.2.1). Ce point reste à vérifier en détail et d'autres sont encore à investiguer. Par exemple, une procédure de fermeture et évacuation systématique peut être envisagée en cas d'accident impliquant un véhicule à énergie alternative pouvant déclencher un événement redouté spécifique aux conséquences graves. Mais le gain de sécurité qu'apporterait une telle procédure doit aussi être comparé aux conséquences qu'elle provoquerait sur le trafic local.

4.1.6 L'impact sur les structures et sur la réouverture du tunnel après un événement

Certains phénomènes spécifiques aux nouveaux modes de propulsion devraient avoir peu d'impact sur la sécurité des usagers. En revanche, ils peuvent causer des dégâts importants sur l'ouvrage, rendant plus difficile et plus longue sa remise en état.

Un exemple de ces phénomènes est l'emballement thermique d'une batterie. L'incendie d'un véhicule électrique étant particulièrement difficile à éteindre, il peut durer beaucoup plus longtemps que celui d'un véhicule classique avec le risque d'endommager plus lourdement la structure et les équipements du tunnel, augmentant l'ampleur des travaux de remise en état et les délais de réouverture.

Les phénomènes explosifs peuvent pour leur part être préjudiciables aux structures se trouvant à proximité, notamment les structures de second œuvre, plus fragiles que la structure principale, telles que les gaines de ventilation ou les cloisons d'issues de secours.

Afin d'appréhender plus globalement leurs conséquences, des études d'évaluation des impacts de tous les événements redoutés spécifiques possibles sont à mener, tant pour les structures principales que celles de second œuvre et les équipements.

Au-delà des seuls impacts sur les structures, ces études pourront aider à préciser les conséquences directes des événements redoutés spécifiques sur les usagers tels que la chute ou la projection de matériaux et d'objets dans des zones où la survie est encore possible.

4.1.7 Les impacts sur l'environnement

Les événements redoutés spécifiques aux nouveaux modes de propulsion des véhicules peuvent avoir des impacts particuliers sur l'environnement.

L'impact principal est une pollution des eaux par les liquides ayant servi à l'extinction d'un incendie de véhicule électrique ou au nettoyage des murs et du plafond du tunnel après le sinistre. Cette pollution peut être supérieure à celle qui serait constatée en cas d'incendie d'un véhicule classique de gabarit similaire, car l'incendie de batterie produit des composés dont la toxicité est supérieure.

Selon une étude du laboratoire fédéral suisse d'essai des matériaux et de recherche (EMPA), l'eau d'extinction d'une batterie électrique possède en effet une charge chimique dépassant significativement les valeurs limites suisses pour les eaux industrielles, et contient des métaux lourds connus pour provoquer de graves réactions allergiques sur la peau nue.

Se pose toutefois la question de prévoir des dispositions propres au cas des tunnels, puisque la problématique y est la même qu'à l'air libre. Il semble qu'une réflexion globale soit à mener au sujet de l'utilisation des bassins de dépollution existants et de leur capacité à traiter le cas spécifique des incendies de véhicules électriques. L'opportunité de réaliser des prélèvements visant à détecter la présence de métaux lourds après un sinistre impliquant un véhicule électrique, voire hybride, pourrait aussi être discutée dans ce cadre plus large.

Dans le cas d'ouvrages souterrains tels que les parcs de stationnement ou celui de tunnels de petite section et faiblement ventilés, la dépollution de l'ouvrage et de ses équipements doit être envisagée. S'il est confirmé qu'elle est nécessaire, elle devra être réalisée par des professionnels équipés en conséquence.

En revanche, dans les ouvrages suffisamment ventilés, qui représentent la majorité des tunnels routiers de plus de 300 mètres, les effets de la ventilation évitent la mise en œuvre de méthodes de dépollution particulières, si l'on retient les seuils suisses²⁷ comme niveau de pollution acceptable.

Néanmoins, quel que soit le type d'ouvrage souterrain et quel que soit son type de ventilation, un nettoyage complet de la structure et des équipements doit être effectué, comme dans tous les cas d'incendie.

4.1.8 La formation et la collaboration de tous les acteurs

Comme indiqué précédemment (cf. 4.1.5), la particularité des événements redoutés spécifiques aux véhicules à énergie alternative pose la question de l'évolution des modalités actuelles de gestion des incidents. La bonne formation de l'ensemble des acteurs à ces évolutions et leur bonne collaboration opérationnelle sont donc primordiales.

Il est d'abord nécessaire que chacun ait connaissance des besoins spécifiques des autres parties prenantes pour la gestion des événements impliquant des véhicules à énergie alternative. Il s'agit ensuite de s'assurer que les modifications apportées aux procédures de chaque acteur soient cohérentes entre elles. Des échanges renforcés sont aussi à instaurer afin que tous les acteurs puissent bénéficier du retour d'expérience de chacun, en particulier celui des services de secours qui sont confrontés aux véhicules à énergie alternative dans des contextes proches (par exemple celui des parcs de stationnement souterrains). Enfin, les exercices constituent un moyen pour que les acteurs assimilent au mieux les spécificités opérationnelles induites par ces nouveaux véhicules, en les mettant en œuvre dans un cadre coopératif.

L'exploitant peut être à l'initiative de cette démarche collaborative.

4.1.9 Les autres enjeux liés à l'augmentation du parc de véhicules propulsés aux nouvelles énergies

Outre la prise en compte des phénomènes dangereux, la gestion de cas a priori plus anodins tels que la panne ou le simple accident matériel doivent être étudiés.

Si, de prime abord, ces cas ne présentent en effet pas de danger pour l'usager, ils peuvent représenter certaines difficultés spécifiques en termes d'intervention. Les exploitants, les services de secours et les dépanneurs doivent les prendre en compte et y répondre en adaptant leurs procédures, le choix des matériels d'intervention utilisés et la formation de leur personnel.

Pour les véhicules électriques, le risque résulte de la présence de batteries dont la capacité²⁸ peut être importante et qui peuvent être équipées de faisceaux électriques à hauts voltage et intensité. De surcroît, il est plus difficile qu'avec un véhicule classique de savoir, depuis l'extérieur, si le véhicule est en fonctionnement ou non. Enfin, une simple pression sur une touche ou un léger appui sur une pédale peut suffire à mettre le véhicule électrique en mouvement, ce qui peut provoquer un sur-accident.

27. Source : *Risk minimization of electric vehicle fires in underground traffic infrastructures*, OFROU, EMPA [Suisse].

28. La capacité d'une batterie est la quantité de courant qu'elle peut fournir au cours du temps.

Pour les véhicules au gaz, il est possible que la chaîne d'alimentation soit détériorée même en cas de petit accident matériel. Contrairement au cas d'un accident violent entraînant des dommages corporels à ses occupants, il est très peu probable qu'un petit accident matériel conduise à une fuite suffisante pour provoquer une explosion, mais l'identification du risque de fuite est à intégrer dans les

procédures d'intervention. Se pose également la question de la vidange, en cas de besoin, d'un réservoir en tunnel. Il est en effet possible que cette vidange crée un nuage de gaz significatif, avec une probabilité non négligeable qu'il rencontre une énergie d'activation suffisante pour l'enflammer, du fait du caractère confiné et des nombreux équipements présents en tunnel.

4.2 LES NOUVEAUX ENJEUX POUR LES SERVICES DE SECOURS

Les particularités des événements spécifiques aux véhicules à énergie alternative ont un impact sur l'action des services de secours, que ce soit avant ou pendant leur intervention.

4.2.1 Avant l'intervention

La réception de l'alerte

En plus des éléments habituellement nécessaires (horaire du début de l'événement, localisation, sens de circulation, équipements de sécurité activés...), le type de véhicule et le type d'énergie de propulsion alternative du ou des véhicules impliqués sont des informations importantes pour les services de secours.

En effet, d'une part, l'énergie de propulsion détermine les phénomènes dangereux susceptibles de se produire, et d'autre part, couplée avec le type de véhicule, elle permet d'anticiper la localisation des équipements sensibles, par exemple les batteries ou les réservoirs de gaz. Cette localisation permet d'estimer les difficultés potentielles d'accès et d'intervention, par exemple en cas de batteries situées sur le toit d'un bus, potentiellement proches de la voûte.

La faisabilité de l'acquisition de ces informations – très dépendante du degré de surveillance de l'ouvrage – doit être examinée avec l'exploitant.

La prévisibilité de la survenance d'un événement spécifique aux nouveaux modes de propulsion

Il est difficile, pour les services de secours, de déterminer avec certitude les événements redoutés spécifiques susceptibles de se produire et leur plage temporelle de danger pour les intervenants.

Plusieurs paramètres rentrent en effet en ligne de compte, tels que les informations disponibles, les délais d'arrivée sur les lieux, et les délais de mise en œuvre des moyens de lutte contre le sinistre.

Pour ce qui est de l'incidence des délais, l'extinction rapide d'un incendie évite par exemple la survenance éventuelle d'une rupture de réservoir et permet donc de réduire significativement les conséquences de l'événement.

En termes d'informations disponibles, si l'observation par vidéo-surveillance d'un phénomène de feu torche sur un véhicule au gaz peut permettre d'estimer plus improbable la rupture d'un réservoir, elle ne permet pas de l'exclure totalement. En effet, les images données par la vidéo-surveillance ne permettent pas de connaître le nombre exact de réservoirs (un feu torche déclenché sur un réservoir n'exclut pas qu'un thermo-fusible ne soit pas activé sur un autre réservoir). À l'inverse, si le feu torche n'est pas visible parce que le réservoir était peu rempli, la rupture de réservoir ne pourra être écartée par l'observateur alors qu'elle n'est pas possible puisque le thermo-fusible avait joué son rôle.

En conséquence, il est raisonnable de penser que le principe retenu par les services de secours sera de considérer que les événements redoutés spécifiques aux nouveaux modes de propulsion peuvent se produire et mettre en danger les personnels intervenants.

4.2.2 Durant l'intervention

Arrivée sur les lieux et collecte d'informations

Lors de leur arrivée sur les lieux, la première action à mener par les services de secours est de compléter les informations dont ils ont eu connaissance lors de l'alerte par une observation sur le terrain. Il s'agit en particulier d'identifier le type des véhicules impliqués et la nature de leur énergie de propulsion. Dans le cas des tunnels surveillés depuis un poste de contrôle, les services de secours y envoient un officier de liaison dont le rôle est d'y collecter le maximum d'informations utiles à l'intervention et de les transmettre en temps réel au commandant des opérations de secours présent sur le terrain.

La tendance au regroupement des postes de contrôle (PC) chargés de la surveillance de nombreux tunnels – et sections de routes à l'air libre – rend de plus en plus difficile l'envoi dans les PC d'un officier de liaison. Aujourd'hui, en effet, un PC peut recouvrir plusieurs départements, voire plusieurs régions, et être séparé de plusieurs centaines de kilomètres des tunnels qu'il supervise. Afin de maintenir la possibilité d'échanges d'informations entre le PC et le terrain pour assurer la bonne intervention des services de secours, des modalités particulières d'échanges doivent être mises en place par l'exploitant et les services de secours.

L'exposition des intervenants aux événements redoutés spécifiques

Les services de secours doivent s'approcher au plus près des véhicules impliqués pour tenter de réduire le danger et limiter les risques. Ils sont donc exposés aux effets directs et indirects des événements redoutés spécifiques aux nouveaux modes de propulsion.

Compte tenu de leur délai d'arrivée sur les lieux, qui est au mieux de l'ordre d'une quinzaine de minutes et beaucoup plus dans certains contextes, les services de secours sont potentiellement moins exposés que les usagers aux événements redoutés se produisant durant les premières minutes. Par exemple, ils sont a priori moins susceptibles d'être confrontés aux explosions de nuage qui peuvent survenir en cas d'accident violent impliquant un véhicule au gaz, car elles adviennent généralement rapidement après le choc. Ils sont en revanche plus exposés que les usagers à la rupture d'un réservoir de gaz si elle est provoquée par un incendie sur le véhicule. La rupture advient en effet au plus tôt huit à vingt minutes après le départ du feu, à un moment où une grande partie des usagers s'est normalement éloignée de la zone dangereuse, mais où les services d'intervention peuvent avoir débuté leur intervention.

Dans une approche conservatrice²⁹, les aires d'effets létaux significatifs des événements redoutés spécifiques aux nouveaux modes de propulsion retenues pour les services de secours sont les mêmes que celles des usagers (3.2).

Les implications opérationnelles

Les aires d'effets des événements redoutés spécifiques conditionnent le choix du matériel à utiliser par les services d'intervention et la distance de sécurité qu'ils doivent respecter par rapport aux véhicules à énergie alternative. Cette distance

de sécurité est néanmoins à mettre en regard de la nécessité d'intervenir au plus près du véhicule afin de porter secours à d'éventuels usagers encore présents à l'intérieur ou à proximité immédiate. Il faut aussi prendre en compte la présence possible d'autres véhicules susceptibles d'être incendiés du fait de ces événements spécifiques (par exemple les feux torches), l'un de ces véhicules pouvant en outre fonctionner aux nouvelles énergies de propulsion.

En l'état actuel des connaissances, certains principes opérationnels d'intervention sur les véhicules à énergie alternative à l'air libre ne peuvent être mis en œuvre en tunnel compte tenu de la particularité de cet espace confiné.

Notamment, le positionnement des services de secours au niveau des trois-quarts avant du véhicule en feu est bien souvent impossible, car il les exposerait aux fumées. En effet, en tunnel, la stratégie de désenfumage consiste souvent à repousser les fumées jusqu'à la tête de sortie, dans le sens de circulation, donc vers l'avant du véhicule incendié.

Plus généralement, la définition des stratégies, des matériels et d'une doctrine opérationnelle pour les services de secours demeure à ce stade complexe. Pour parvenir à mieux définir ces stratégies, les connaissances et le retour d'expérience sur les effets des événements redoutés spécifiques aux véhicules à énergie alternative en tunnel doivent être confortés.

Par exemple, il reste à déterminer si les équipements présents dans les tunnels, en fonction de leur position, de leur nature, et de leur mode de fixation, peuvent être des sources de danger en cas d'événement spécifique. Les premiers résultats concernant le risque de chute d'équipement en cas de feu torche sont a priori rassurants, car, à ce stade, ils concluent à l'absence de risque significatif. Ils restent toutefois à confirmer. Le risque de chute d'équipement sous l'effet d'une rupture de réservoir ou de l'explosion d'un nuage de gaz reste pour sa part à préciser, même s'il peut être considéré comme relevant des effets indirects pris en compte dans les effets létaux significatifs (cf. 3.2).

Enfin, de nombreux éléments sont de nature à complexifier l'intervention des services de secours et susceptibles d'augmenter le risque pour les intervenants : multiplication des types de technologies de propulsion, multiplication des constructeurs dotant chacun ses véhicules de dispositifs particuliers, connaissance imparfaite de technologies en perpétuelle évolution, ou encore variabilité des conséquences des événements redoutés.

29. Les pompiers ont une meilleure condition physique et des vêtements plus protecteurs que les usagers pris comme référence pour le calcul des aires d'effets létaux significatifs.

LES NOUVEAUX ENJEUX POUR LES GESTIONNAIRES DE FLOTTES DE TRANSPORT PUBLIC

L'introduction de véhicules à énergie alternative dans les flottes des opérateurs de transport public induit des contraintes importantes en termes d'exploitation du réseau, de maintenance, et de gestion du patrimoine roulant comme immobilier. Ces contraintes s'ajoutent, le cas échéant, aux restrictions de circulation existant dans les tunnels.

4.3.1 Les contraintes pesant sur l'usage des véhicules électriques

Contraintes sur l'exploitation du réseau

Les véhicules électriques disposent d'une autonomie bien inférieure aux bus diesel auxquels ils ne peuvent donc se substituer pour tous les services ou besoins. La recharge lente des batteries au dépôt est la méthode la plus couramment utilisée et prend entre quatre et six heures. Ce type de recharge est généralement effectué de nuit. Un complément de charge peut être effectué en journée si les bus reviennent au dépôt, mais cela suppose un temps d'immobilisation supplémentaire.

Par ailleurs, le véhicule électrique n'étant pas disponible aujourd'hui pour tous les gabarits (autocars, bus articulés), cela peut empêcher son utilisation sur certaines lignes.

Enfin, les batteries étant l'organe le plus sensible et le plus onéreux d'un bus électrique, des conditions précises de bonne utilisation de ces dernières sont à définir avec le constructeur, ce qui peut induire des contraintes pour l'exploitation.

Le remplacement de bus diesel par des bus électriques peut ainsi avoir pour conséquence un besoin en matériels ou en personnels supplémentaires, voire une modification des services.

Contraintes de maintenance

L'entretien des véhicules électriques, bien différent de celui des véhicules à moteur thermique, nécessite une formation spécifique des mainteneurs.

Les bornes de recharge sont pour leur part des systèmes assez complexes, qui comportent leurs propres règles de maintenance. Elles doivent faire l'objet d'opérations de suivi et de maintenance, y compris des mises à jour logicielles, au fil des évolutions logicielles apportées aux véhicules eux-mêmes et lors de l'arrivée de nouveaux constructeurs dans la flotte.

Une adaptation de l'atelier à la maintenance des véhicules électriques est également nécessaire, avec par exemple l'installation de systèmes de détection incendie et de rétention des eaux d'extinction.

Contraintes de gestion du patrimoine roulant et immobilier

Les batteries ont une durée de vie estimée à environ huit ans, soit approximativement la moitié de la durée d'exploitation d'un bus. Ce fort coût de changement des batteries doit donc être anticipé.

Les installations de recharge et de stockage doivent en outre respecter des règles d'environnement particulières (distances de sécurité minimales, présence de murs coupe-feu, présence d'une place de quarantaine). Elles sont soumises à l'arrêté du 3 août 2018 – rubrique ICPE 2925 applicable aux ateliers de charge des batteries – et doivent par conséquent faire l'objet d'une déclaration au titre des ICPE avant la mise en service du projet.

Il découle de ces obligations réglementaires que les AOM doivent respecter des distances minimales d'éloignement entre, d'une part leurs limites de propriété, et d'autre part leurs ateliers ou leurs places de charge lente. Pour des installations non situées en-dessous d'espaces occupés par des tiers, des distances de sécurité – allant jusqu'à 15 mètres par rapport aux limites de l'établissement – s'imposent en l'absence de mur coupe-feu séparatif et de système d'extinction automatique. Une place de quarantaine isolée et fermée doit aussi être mise à disposition en permanence, afin de pouvoir accueillir un véhicule dont les batteries ont été endommagées. Toutes ces contraintes peuvent empêcher la conversion de certaines zones et impactent le foncier disponible au dépôt, qui est souvent limité en zone urbaine.

Des protections électriques permettant de couper la charge électrique au niveau des bornes de charge, des dispositifs d'urgence et des systèmes de sécurité (détecteurs d'incendie, moyens d'alerte, etc.), ainsi que des moyens de lutte contre l'incendie (extincteurs, colonnes sèches, désenfumage, etc.) doivent également être mis en place.

4.3.2 Les contraintes pesant sur l'usage des véhicules au GNV et à l'hydrogène comprimé

Contraintes sur l'exploitation du réseau

Le temps de recharge d'un véhicule au gaz est de quatre à six heures pour une charge lente, et de 5 à 10 minutes pour une charge rapide.

Pour les véhicules à hydrogène, une durée d'environ 20 à 25 minutes est nécessaire pour remplir 25 kg d'hydrogène.

Ces temps de recharge, globalement plus longs que ceux des véhicules diesel, doivent donc être pris en compte pour l'organisation des services.

Contraintes de maintenance

Les interventions de maintenance sur des bus fonctionnant au gaz nécessitent une habilitation pour le personnel. Ces opérations sont cependant en partie similaires à celles effectuées sur les véhicules diesel.

En ce qui concerne la maintenance des véhicules à hydrogène, une habilitation portant au moins sur la maintenance des véhicules au gaz et électriques peut être nécessaire.

Pour les interventions régulières sur le circuit d'hydrogène et sur la pile à combustible, le constructeur reste le seul habilité.

Contraintes de gestion du patrimoine roulant et immobilier

Les véhicules au GNV et à hydrogène doivent être rechargés dans une station propre à leur énergie si leur dépôt n'est pas converti. Le maillage des stations GNV est à l'heure actuelle bien plus conséquent que celui des stations d'hydrogène.

En plus des règles d'urbanisme qui s'appliquent à la localisation du dépôt de remisage, les technologies utilisant du gaz peuvent être soumises à des normes ICPE et ATEX.

Les deux technologies GNV et hydrogène doivent en particulier faire l'objet d'une étude de zonage ATEX (ATmosphères EXplosives) selon les directives européennes 1994/9/CE et 1999/92/CE, afin de vérifier que les environnements de travail sont conformes.

La technologie GNV est soumise à la réglementation ICPE, rubrique 1413 (arrêté du 7 janvier 2003) pour l'implantation des dépôts. Les stations sont soumises à déclaration si leur débit de compression excède 80 m³/h, ou si elles stockent plus d'une tonne de gaz. Elles sont soumises à autorisation si leur débit dépasse 2000 m³/h de capacité de compression, ou si leur volume de stockage de gaz excède 10 tonnes. L'ensemble des installations doit être implanté au niveau de la voirie – implantation en sous-sol interdite – et en aucun cas dans un immeuble « habité ou occupé par des tiers ».

Certaines distances de sécurité peuvent être contraignantes en milieu urbain. Par exemple, les appareils de distribution doivent se trouver à 17 mètres des issues des bâtiments extérieurs, distance ramenée à 12 mètres en présence d'un mur coupe-feu. Les compresseurs doivent pour leur part se trouver à 10 mètres des limites du site (3 mètres en présence d'un mur coupe-feu).

La technologie hydrogène est soumise à la rubrique 3420 de la réglementation ICPE pour sa production, et à la rubrique 4715 pour son stockage. Les installations sont soumises à autorisation si leur volume de stockage dépasse 1 tonne, ce qui signifie qu'une autorisation est nécessaire pour toute

exploitation de flotte de transport urbain. Les distances d'isolement à respecter pour les différents éléments de stockage et de distribution d'hydrogène sont analogues à celles requises pour le gaz naturel (distance de 10 mètres requise entre le point de stockage de l'hydrogène et les limites du site, ainsi que tout bâtiment).

Les coûts d'aménagement des dépôts de bus et autres flottes commerciales pour l'intégration des nouveaux véhicules propulsés par du gaz sont donc significatifs, et une perte de capacité n'est pas exclue.

4.3.3 Les contraintes liées au coût des nouveaux modes de propulsion

Coût d'achat des véhicules

Les bus à propulsion alternative sont plus onéreux que les bus diesel. Même si les prix varient d'un modèle à l'autre et dépendent des quantités achetées, on peut retenir, à la date de ce document, la valeur d'environ 230 000 € comme ordre de grandeur du prix d'achat d'un bus diesel standard.

Un bus équivalent propulsé au gaz naturel coûte environ 280 000 €, et il n'est pas certain que l'écart de prix se réduira significativement à l'avenir, car la filière est déjà développée et le système à gaz est plus complexe qu'un simple réservoir de carburant liquide.

Le prix d'un bus électrique est considérablement plus élevé. Il est à ce jour de l'ordre de 500 000 €. Il faut y ajouter les coûts induits par les contraintes d'exploitation évoquées précédemment, ainsi que le coût de remplacement de la batterie à environ la moitié de la durée de vie du véhicule. Une baisse sensible du prix des batteries dans les années à venir³⁰ peut être espérée.

Enfin, un bus hydrogène coûte aujourd'hui 850 000 € environ. Son prix reste élevé, car la technologie demeure peu développée, en raison notamment des difficultés d'approvisionnement en hydrogène « vert ».

Les coûts de maintenance peuvent augmenter en raison, notamment, du besoin de formation des personnels sur les nouveaux matériels.

Coût complémentaire d'aménagement des dépôts

Au coût d'achat des véhicules s'ajoute celui d'aménagement des dépôts (infrastructures de recharge, extensions nécessaires pour respecter les distances d'isolement, etc.), qui peut être évalué actuellement à 65 000 € par place pour le gaz et 130 000 € pour l'électrique, soit des montants très significatifs par rapport à celui d'acquisition des véhicules.

30. Le prix moyen du kWh de batterie lithium-ion a été divisé par trois entre 2015 et 2020.

CONCLUSIONS

Les nouvelles énergies de propulsion connaissent un développement rapide, rendu nécessaire par l'urgence de la lutte contre le changement climatique.

La volonté politique générale, en France et dans la plupart des pays occidentaux, va clairement dans ce sens, en s'appuyant sur des outils législatifs rendant obligatoire l'introduction de nouvelles énergies dans certaines flottes (flottes de transports en commun et flottes d'entreprises), ainsi que sur des incitations fiscales, ou encore des restrictions locales de circulation (Zone à Faibles Émissions mobilité).

Cette présence croissante de nouveaux types de vecteurs énergétiques, comme l'électricité en batteries ou les gaz comprimés en réservoirs, modifie le paysage des risques en tunnel.

Les feux de batteries après emballement thermique ont ainsi des caractéristiques propres. La puissance totale du feu de véhicule qui en résulte, ainsi que sa toxicité, sont peu modifiées, mais l'extinction peut s'avérer très difficile et nettement plus longue que pour un véhicule classique. Pour les batteries les plus courantes, c'est-à-dire excluant les batteries LMP et les batteries très particulières, ce phénomène d'emballement n'est pas immédiat et est susceptible de concerner davantage les services de secours que les usagers.

Les gaz comprimés (gaz naturel ou hydrogène) et leurs systèmes de sécurité peuvent pour leur part provoquer des feux torches. Localisés dans le temps et dans l'espace, ils ont un impact limité sur les usagers dans la plupart des cas. Toutefois, s'ils adviennent sur certains bus, cet impact peut être plus marqué, notamment en cas d'évacuation tardive. Ces gaz introduisent également des risques d'explosion : explosion de nuage en cas de fuite importante ou de déclenchement inopiné du système de sécurité, ou éclatement de réservoir en cas de dysfonctionnement de celui-ci et d'incendie du véhicule. Les aires d'effets létaux de tels incidents ont un rayon variant de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres, et soumettent les personnes présentes dans cette zone à un risque de blessure ou de décès. En cas de rupture d'un réservoir de gaz liquide, toutefois très improbable grâce à la double soupape qui l'équipe, l'aire d'effets létaux est de plusieurs centaines de mètres avec, en conséquence, un impact potentiel sur les usagers beaucoup plus grave. Néanmoins, pour l'un des deux principaux modes de stockage utilisés (10 bars et - 130°C), la rupture n'est pas immédiate et laisse une dizaine de minutes pour la mise en sécurité des usagers après le début de l'incendie. Pour l'autre principal mode de stockage (1,1 bar et - 160°C), ce délai pourrait être beaucoup plus court et reste à clarifier.

Les taux de survenance prévisionnels de la majorité des incidents liés aux nouveaux modes de propulsion, même estimés de façon conservatrice, sont quant à eux nettement plus faibles que ceux des incendies rencontrés jusqu'ici.

La démarche de sécurité mise en œuvre depuis plus de vingt ans en tunnel considère cet ouvrage comme un véritable système dans lequel interagissent l'infrastructure, les véhicules, les usagers, l'exploitant et les services de secours. Cette démarche vise notamment à optimiser chacune des composantes du système et leur interaction au service de la sécurité. Cette approche systémique conserve toute sa pertinence dans le contexte du développement des nouveaux modes de propulsion. Il convient simplement de l'adapter pour faire face aux événements redoutés graves nouveaux qui nécessitent une prise en compte spécifique.

La prévention et la gestion de ces événements doivent se faire en utilisant l'ensemble des possibilités offertes par le système : entretien des véhicules, formation des conducteurs et des opérateurs, procédures adaptées, etc.

Dans une grande partie de ces nouvelles situations, une évacuation rapide des usagers est de première importance, peut-être encore davantage que pour les incendies de véhicules classiques. Sur le plan technique, des travaux restent à mener pour évaluer la faisabilité et l'intérêt réel de l'utilisation de la ventilation, ou encore de systèmes d'identification et de détection. La réduction des diamètres des thermo-fusibles afin de réduire les conséquences des explosions de nuages est également une piste prometteuse.

Les services de secours sont pour leur part confrontés à des situations nouvelles. Compte tenu de la chronologie de leur intervention, leur exposition au risque d'explosion ou de feu torche pourrait être supérieure à celle des usagers si ceux-ci évacuent rapidement l'ouvrage. Leurs procédures d'intervention doivent être adaptées à ces risques, ainsi qu'aux incertitudes qui pèsent sur la nature précise de l'événement à traiter, en raison de la difficulté à identifier sur le terrain l'énergie de propulsion des véhicules et les risques associés.

Au-delà des risques examinés en détail dans ce document, certaines considérations méritent l'attention de l'ensemble des intervenants : le contenu des procédures à suivre en cas de panne ou d'accident, la prévention de la pollution des eaux, ou encore l'inspection des ouvrages après un événement impliquant des véhicules à nouvelles énergies.

L'évolution des mobilités nécessite donc des efforts d'adaptation de l'ensemble des acteurs : particuliers, professionnels du transport de voyageurs ou de marchandises, constructeurs, industriels de l'énergie, gestionnaires d'infrastructures, etc. Les acteurs de la sécurité des tunnels ne font pas exception, et doivent œuvrer avec leurs partenaires scientifiques, techniques et institutionnels pour continuer à répondre aux exigences de sécurité dans les tunnels routiers.

Cette démarche est une nécessité en France mais également sur le plan international car ces nouvelles énergies de propulsion se développeront à terme dans la plupart des pays. Le comité « exploitation des tunnels routiers » de l'association mondiale de la route (PIARC) entend ainsi poursuivre les premiers travaux réalisés sur le sujet et auxquels le CETU a contribué [12]. Sur le plan national, le CETU a dédié un axe de recherche aux problématiques soulevées par le présent document.

LISTE DES FIGURES ET ILLUSTRATIONS

Figure 1	Évolution prévue des émissions et des puits de GES sur le territoire français entre 1990 et 2050 (en MtCO _{2eq}) Inventaire CITEPA 2018 et scénario SNBC révisée (neutralité carbone)	9
Figure 2	Exemple de position des batteries sur un véhicule léger électrique	12
Figure 3	Emballlement thermique : arbre des causes et conséquences	13
Figure 4	Schéma d'un véhicule GNC	14
Figure 5	Principaux systèmes de sécurité d'un véhicule GNC	14
Figure 6	Feu torche : arbre des causes et conséquences	15
Figure 7	Explosion de nuage : arbre des causes et conséquences	15
Figure 8	Rupture de réservoir : arbre des causes et conséquences	16
Figure 9	Schéma d'un véhicule fonctionnant à l'hydrogène comprimé	16
Figure 10	Réservoir GNL sur un poids lourd	18
Figure 11	Feu torche sur un poids lourd fonctionnant au GNL : arbre des causes et conséquences	18
Figure 12	Explosion de nuage sur un poids lourd fonctionnant au GNL : arbre des causes et conséquences	19
Figure 13	Rupture de réservoir sur un poids lourd fonctionnant au GNL : arbre des causes et conséquences	19
Figure 14	Feu torche orienté vers la droite en cas de bus sur la voie de droite (orange : flamme, rose : iso surface à 120°C)	24
Figure 15	Batteries sur un bus électrique	27
Figure 16	Réservoirs GNC sur un bus	27
Figure 17	Remplissage d'un réservoir de poids lourd GNL	30

BIBLIOGRAPHIE

- [1] CEE ONU, *Règlement no 110 de la Commission économique pour l'Europe des Nations unies*, 2022.
- [2] Plate-Forme Automobile, Fédération Française de Carrosserie, AVERE-France et Union Routière Française, *Livre Blanc : L'électricité pour la filière des véhicules industriels*, 2019.
- [3] Plate-Forme Automobile (PFA), *Position technique de filière : hydrogène et piles à combustible*, 2020.
- [4] Plate-Forme Automobile, Fédération française de Carrosserie et AFGNV, *Livre Blanc : Le gaz naturel pour la filière des véhicules industriels*, 2017.
- [5] CEE ONU, *Règlement ONU n°100 - Prescriptions uniformes relatives à l'homologation des véhicules en ce qui concerne les dispositions particulières applicables à la chaîne de traction électrique*, 2021.
- [6] CEE ONU, *Règlement n°134 - Prescriptions uniformes relatives à l'homologation des véhicules automobiles et de leurs composants en ce qui concerne les prescriptions de sécurité des véhicules fonctionnant à l'hydrogène*, 2015.
- [7] C. Willmann et B. Truchot, *New energy carriers and additional risks for user safety in tunnels*, chez Interflam, 2019.
- [8] C. Willmann and B. Truchot, « User's safety in tunnels - Additional risks of new energy carriers vehicles » in *International Symposium on Aerodynamics, Ventilation and Fires in Tunnels*, Athens, Greece, 2019.
- [9] V. Molkov et W. Dery, « The blast wave decay correlation fro hydrogen tank rupture in a tunnel fire » in *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, pp. 31289-31302, 2020.
- [10] S. Kudriakov, E. Studer, G. Bernard-Michel, D. Bouix, L. Domergue, D. Forero, H. Gueguen, C. Ledier, P. Manicardi, M. Martin et F. Sauzedde, « Full-scale tunnel experiments: Blast wave and fireball evolution following hydrogen tank rupture » in *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, pp. 18911-18933, 2022.
- [11] CETU, Les documents d'information, *Pannes, accidents et incendies en tunnel routier - Éléments statistiques*, 2022.
- [12] PIARC, TC 4.4, *Rapport Impact des nouvelles technologies de propulsion sur l'exploitation et la sécurité des tunnels*, 2024.

GLOSSAIRE

AFGNV : Association Française du Gaz Naturel pour Véhicules, association professionnelle de la filière GNV.

AOM : Autorité Organisatrice de la Mobilité (en zone urbaine). Elle est chargée, sur son territoire de compétence, de définir les objectifs en termes de service public de transport, de conduire les projets d'infrastructure correspondants, ainsi que les acquisitions de véhicules et autres matériels. Elle peut exploiter le réseau en régie ou confier cette mission à un opérateur (entreprise ferroviaire telle que la SNCF, ou entreprise privée d'exploitation de réseaux urbains). À l'échelle des agglomérations, l'AOM est souvent la structure intercommunale, ou un syndicat ou établissement public dépendant de l'intercommunalité.

AOT : Autorité Organisatrice des Transports (interurbains). Les AOT sont l'équivalent des AOM, mais pour les zones interurbaines. Les régions sont des AOT.

ATEX : Atmosphère Explosive.

BEA-TT : Bureau d'Enquêtes sur les Accidents de Transports Terrestres, organisme indépendant ayant pour mission d'analyser les causes des accidents routiers, ferroviaires et fluviaux et d'en tirer des recommandations à l'intention des autorités compétentes.

BEV : *Battery Electric Vehicle* (véhicule électrique à batterie).

BLEVE : *Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*. Vaporisation explosive d'un liquide, généralement déclenchée par la rupture d'une enceinte contenant un gaz liquéfié. Le BLEVE peut se produire avec des gaz non inflammables (onde de pression générée par l'expansion liée au changement de phase), mais est aggravé par les effets de la combustion lorsqu'une substance inflammable est mise en jeu.

BMS : *Battery Management System*, système de gestion de la batterie. Système électronique embarqué permettant de minimiser les risques d'origine électrique pour la batterie (surcharge, surintensité, etc.), ainsi que d'optimiser son rendement et sa durée de vie.

CH₂ : Hydrogène comprimé.

CNESOR : Commission Nationale d'Évaluation de la Sécurité des Ouvrages Routiers.

COP 21 : 21^{ème} Conférence des parties à l'accord des Nations Unies sur le climat, tenue à Paris en 2015, au cours de laquelle l'engagement a été pris de conduire des actions visant à limiter le réchauffement de l'atmosphère terrestre à 2°C à l'horizon 2100 par rapport à l'ère préindustrielle.

COS : Commandant des Opérations de Secours, officier de sapeurs-pompiers dirigeant une intervention mobilisant de nombreux intervenants.

EMI : Énergie Minimale d'Inflammation, énergie minimale nécessaire à l'inflammation d'un mélange gazeux inflammable (concentration du combustible comprise entre la LIE et la LSE).

ESD : Étude Spécifique des Dangers.

FFC : Fédération Française de la Carrosserie.

GES : Gaz à Effet de Serre.

GNC : Gaz Naturel Comprimé, stocké sous forme gazeuse à température ambiante, dans des réservoirs à haute pression (20 MPa). Sigle anglais : CNG.

GNL : Gaz Naturel Liquéfié, stocké à – 160°C dans des réservoirs sous pression modérée (1,2 MPa). Sigle anglais : LNG.

GNV : Gaz Naturel pour Véhicules (comprend le GNC et le GNL). L'appellation BioGNV est utilisée pour le GNV produit à partir de biomasse.

GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié.

ICE : *Internal Combustion Engine*, moteur à combustion interne ; le combustible peut être un hydrocarbure liquide (essence, gazole) ou gazeux (gaz naturel, gaz de pétrole liquéfié voire hydrogène). Les véhicules à hydrogène qui entrent dans cette catégorie sont à différencier des véhicules à hydrogène dotés d'une pile à combustible ; les risques liés au stockage d'hydrogène en réservoir sont toutefois identiques pour les deux types.

ICPE : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement.

LAPI : Lecteur Automatique de Plaques d'Immatriculation.

LFP : Lithium-Fer-Phosphate. Technologie de cathode rencontrée sur certains véhicules électriques (minoritaire mais en développement).

LH₂ : Hydrogène liquéfié.

LIE, LSE : Limite Inférieure d'Explosibilité et Limite Supérieure d'Explosibilité. Concentrations en combustible (généralement exprimées en volume) minimale et maximale permettant l'explosion d'un mélange gazeux si l'énergie d'activation nécessaire est apportée. On utilise également LII et LSI pour Limite Inférieure (respectivement supérieure) d'Inflammabilité.

LMP ou LiPo : Lithium Métal Polymère. Technologie de batterie caractérisée par une cathode en lithium sous forme métallique et une matrice électrolyte polymère.

LOM : Loi d'Orientation des Mobilités.

LTECV : Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte.

NCA : Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium. Technologie de cathode rencontrée sur certains véhicules électriques (minoritaire et plutôt ancienne).

NEC : *New Energy Carriers*. Dénomination générique des nouvelles énergies de propulsion en anglais.

NMC : Lithium-Nickel-Manganèse-Cobalt. Technologie de cathode la plus répandue actuellement (en 2023) pour les applications automobiles.

PC : Poste de Commandement (ou de Contrôle).

PFA : Plate-Forme Automobile. Association professionnelle de l'industrie automobile.

PHEV : *Plug-in Hybrid Electric Vehicle*. Véhicule hybride rechargeable.

PL : poids lourd. Véhicule de transport de marchandises dont le poids autorisé en charge est supérieur à 3,5 tonnes.

Rétrofit : Opération consistant à modifier la carburation, voire la motorisation d'un véhicule ; par exemple, conversion d'un véhicule à essence en véhicule au gaz naturel ou électrique.

Service plug : connecteur électrique permettant d'isoler la batterie d'un véhicule électrique pour entretien.

SNBC : Stratégie Nationale Bas Carbone.

TAI : Température d'Auto-Inflammation. Température à laquelle un mélange combustible s'enflamme spontanément, sans autre apport d'énergie.

TPRD : *Thermally activated Pressure Relief Device*. Dispositif de relâchement de pression à déclenchement thermique. Les TPRD protègent les réservoirs de gaz à haute pression contre les effets de l'incendie, en permettant leur vidange en cas de température élevée (supérieure à 110°C) avant que la structure du réservoir ne soit affaiblie. En français : thermo-fusible.

TMD : Transport de Marchandises Dangereuses.

VCE : *Vapour Cloud Explosion*. Explosion de nuage de vapeur.

VL : Véhicule léger. Véhicule de transport de personnes dont le poids autorisé en charge est inférieur à 3,5 tonnes.

VUL : Véhicule utilitaire léger. Véhicule de transport de marchandises dont le poids autorisé en charge est inférieur à 3,5 tonnes.

ZFE-m : Zone à Faibles Émissions mobilité (anciennement ZFE : Zone à Faibles Émissions). Zone urbaine dense dans laquelle la circulation des véhicules routiers les plus polluants est interdite.

NOTES

This image shows a full page of blank, lined paper. It features approximately 20 horizontal blue lines spaced evenly across the page, typical of notebook or primary writing paper. The lines are thin and light blue, set against a plain white background. There are no margins, text, or other markings on the page.

NOTES

This image shows a single sheet of white paper with horizontal blue ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

PILOTAGE DE LA RÉDACTION

Antoine MOS et Christophe WILLMANN (CETU)

CONTRIBUTEURS

Pascal BLANC (ATMB), Jean-François BURKHART (CETU), Magalie CAMPMAS (SYTRAL), Thomas CREMOUX (CARA), David GIULIANI (GEIE-TMB), Laure PARIS (BG ex SYTRAL), Olivier PERONNE (SNCF ex DGSCGC), Florent SAVY (IDFM)

Centre d'Études des Tunnels

25 avenue François Mitterrand
69500 BRON - FRANCE
Tél. +33 (0)4 72 14 34 00
Fax. +33 (0)4 72 14 34 30
cetu@developpement-durable.gouv.fr

www.cetu.developpement-durable.gouv.fr



**MINISTÈRE
CHARGÉ
DES TRANSPORTS**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

