

Étude des feux de référence en tunnel de transports guidés urbains

Synthèse

En collaboration avec :



MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET SOLIDAIRE

Préambule

La direction générale des infrastructures, des transports et de la mer (DGITM) et la direction générale de la sécurité civile et de la gestion des crises (DGSCGC), considérant d'une part qu'il importait de caractériser les risques encourus liés au dégagement de fumée dans une situation, bien que très rare, où des rames se trouveraient arrêtées en tunnel et d'autre part, qu'il existait un besoin d'apporter des assurances aux services de secours, ont confié au CETU et au STRMTG en lien avec l'IFSTTAR, l'étude de la caractérisation du risque d'incendie pour les tunnels des transports guidés urbains conformes à l'instruction technique du 22 de novembre 2005.

Les deux premières phases, portant sur l'identification des sources potentielles d'incendie et l'analyse des risques d'immobilisation d'un train en tunnel, ont été confiées à l'IFSTTAR sous maîtrise d'œuvre STRMTG ; les deux dernières portant sur le comportement au feu et les caractéristiques des feux de référence du matériel roulant ainsi que les risques connexes, au CETU.

Afin d'assurer le suivi de cette étude, un comité de pilotage a été constitué, associant les services précités, les opérateurs de transports guidés urbains et les services de secours.

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.

Étude des feux de référence en tunnel de transports guidés urbains

Synthèse

Avril 2019

Centre d'Études des Tunnels CETU

25, avenue François Mitterrand
69674 Bron Cedex – 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

Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés STRMTG

1461 rue de la piscine – Domaine universitaire
38400 Saint Martin d'Hères
Tél. : +33 (0)4 76 63 78 78

strmtg@developpement-durable.gouv.fr
www.strmtg.developpement-durable.gouv.fr

IFSTTAR – ESTAS

20, rue Élisée Reclus
BP 70317 F-59666 Villeneuve d'Ascq Cedex
Tél. : +33 (0)3 20 43 83 40

www.estas.ifsttar.fr

ISBN 978-2-11-155676-8

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	3
1 Caractérisation de la source d'incendie et des risques d'immobilisation en tunnel	4
1.1 Analyse macroscopique	5
1.2 Analyse par arbre de causes	5
1.3 ScÉNario d'incident générique	7
2 Analyse du comportement au feu des matériels roulants neufs	8
2.1 Origine et développement du feu	8
2.2 Contexte normatif	8
2.3 Choix de la source d'ignition	9
2.4 Construction des feux de référence	9
3 Identification des risques encourus en cas d'évènement « feu-fumée »	2
3.1 Scénarios étudiés	2
3.2 Critères quantitatifs d'analyse	2
3.3 Méthode et hypothèses de modélisation	2
3.4 Résultats des modélisations pour les six scénarios	3
Principales conclusions	6

INTRODUCTION

La sécurité des tunnels de transports guidés urbains constitue un enjeu capital pour l'ensemble des acteurs du secteur. En France, les tunnels représentent 84 % du linéaire des métros, 26 % du linéaire du RER (hors RFN) et 0,5 % du linéaire des tramways.

L'incendie est un des accidents redoutés identifiés dans les analyses de risques des systèmes de transports guidés. Un feu se déclarant dans un tunnel peut en effet avoir des conséquences dramatiques, tant au niveau humain qu'au niveau des infrastructures et du matériel roulant. Le confinement du milieu peut aggraver l'incendie en intensifiant ses conséquences (évacuation plus problématique, concentration de fumées, température élevée, ...) et rendre plus difficile les conditions d'intervention des services de secours sur le sinistre.

Depuis de nombreuses années, suite à des incendies tragiques survenus dans des tunnels routiers, ferroviaires ou de métro, des études et des recherches ont été menées et des actions ont été mises en œuvre pour sécuriser le matériel et les installations vis-à-vis de ce risque : application de normes anti-feu, instructions techniques réglementaires.

Sans rappeler de façon exhaustive l'ensemble de cette réglementation et des normes appliquées en France, on peut citer :

- Sur le volet réglementaire, l'Instruction Technique Sécurité Tunnels du 22 de novembre 2005 relative à la sécurité dans les tunnels des systèmes de transport public guidés urbains de personnes. Cette instruction technique est annexée à l'arrêté du 22 novembre 2005. Elle précise son champ d'application qui couvre le comportement au feu des matériaux, les dispositions relatives aux véhicules, les dispositions relatives à l'évacuation des personnes, les dispositions relatives à l'alimentation électrique des équipements de sécurité, les équipements de ventilation et de désenfumage, les équipements nécessaires à l'intervention des

secours, les exigences de maintenance et de contrôle périodique,

- Sur le volet normatif, la norme EN45545 est relative à la protection contre les incendies dans les véhicules ferroviaires. Elle est obligatoire dans le domaine ferroviaire et d'usage « volontaire » pour le domaine du transport guidé urbain. Elle a pour objectif de protéger les voyageurs et le personnel en cas d'incendie à bord de ce type de véhicules. Cette norme décrit les mesures et les exigences qui doivent être prises en compte dans la conception des véhicules, dans le contexte de l'infrastructure sur laquelle ils sont exploités.

Dans ce contexte et dans l'objectif d'avoir une connaissance plus précise de ce risque « incendie », l'État (la DGITM et la DGSCGC) a initié en février 2016, une étude intitulée « étude des feux de référence en tunnel de transports guidés urbains », visant à caractériser le risque d'incendie dans les transports guidés urbains en milieu confiné. Cette étude concerne les systèmes de transports guidés urbains conformes à l'IT 2005 et aux normes EN 45545, principalement les futurs systèmes à mettre en service, mais s'appuie sur le retour d'expérience des systèmes antérieurs sur la période 2005-2014. Elle est à mettre en perspective avec l'état des lieux des tunnels TGU existants dressé par le STRMTG en 2013 [4].

L'étude s'articule autour des quatre phases suivantes :

- Phase 1 : caractérisation de la source d'incendie en transports guidés urbains ;
- Phase 2 : qualification des facteurs aggravants et des risques d'immobilisation en tunnel ;
- Phase 3 : analyse du comportement au feu du matériel roulant ;
- Phase 4 : identification des risques connexes en particulier pour les trains croiseurs et suiveurs.

CARACTÉRISATION DE LA SOURCE D'INCENDIE ET QUALIFICATION DES RISQUES D'IMMOBILISATION EN TUNNEL

Cette synthèse rappelle les résultats des phases 1 et 2 réalisées par l'IFSTTAR et dont les objectifs étaient la caractérisation de la source d'incendie en transports guidés urbains, la qualification des facteurs aggravants et des risques d'immobilisation en tunnel. Ces résultats ont alimenté les phases 3 et 4 de l'étude confiées au CETU. Elle tente de dégager, selon la perception de l'IFSTTAR et sous sa seule responsabilité, quelques pistes de recommandations. Il nous apparaît important de préciser que les données disponibles pour mener à bien les phases 1 et 2 ont été peu nombreuses, ceci est lié à la rareté des incendies graves et au faible nombre d'informations disponibles pour chaque accident (confidentialité des données, procédures et rapports d'incident indisponibles ou peu détaillés). Au regard de cette faible quantité de données, il n'a pas été possible de probabiliser le risque et il faut prendre les résultats obtenus avec précautions sans en oublier le contexte.

En France, les objectifs de sécurité pour les systèmes de transport guidés sont fixés par les normes et la réglementation de sécurité élaborée par les autorités de l'État.

C'est dans ce contexte réglementaire et normatif actuel enrichi par le retour d'expérience (REX) et les règles de l'art que les risques susceptibles d'affecter le système de transports ont identifiés et « couverts » par les ingénieurs tout au long du processus de conception-développement-validation au travers du dossier de sécurité. Ce document permet de s'assurer que la réglementation et les normes en vigueur sont respectées, que l'ensemble des critères techniques, environnementaux et humains ont été pris en compte et que toutes les interfaces et interactions avec l'environnement du système ne remettent pas en cause la sécurité du système. Il montre également que les règles employées pour la conception, la construction et l'exploitation assurent la sécurité du système et son

maintien dans le temps. Dans les systèmes de transports guidés urbains, la sécurité dans les tunnels résulte d'une combinaison de mesures prises au niveau de l'infrastructure, de l'exploitation et du matériel roulant, complétée par des mesures adaptées pour faciliter l'intervention des services de secours.

Ce même contexte réglementaire et normatif limite aujourd'hui le risque d'incendie pour les réseaux de transports guidés les plus récents et ceux qui ont fait l'objet de rénovations récentes. Néanmoins, comme pour tout risque industriel, le risque « zéro » n'existe pas, le système de transport peut subir des défaillances d'origine technique, organisationnelle ou humaine ou faire l'objet d'actes délictueux. Même s'ils ne sont pas concernés par l'étude, il faut soulever le cas des réseaux plus anciens qui n'ont pas fait l'objet de rénovation et pour lesquels les normes actuelles ne s'appliquent pas. Ces derniers pourraient donc présenter un risque « incendie » plus important. Il faut également considérer les réseaux pour lesquels le matériel roulant a été remplacé ou rénové, faisant coexister des matériels nouveaux avec des installations d'âge, de conception, de protection vis-à-vis du risque incendie différentes.

Notre étude confirme, à partir des données exploitées et l'étude bibliographique réalisée, que les incendies critiques pour les TGU sont rares (49 sur la période 1903-2004). Les réseaux sont néanmoins confrontés à des incidents « feu-fumée » réguliers : 323 cas d'incidents « feu-fumée » ont pu être recensés sur la période 2005-2014 sur le territoire français. Les événements recensés intéressent pour l'essentiel les réseaux de conception et d'équipement antérieurs à l'instruction et aux normes précitées. Ils constituent un retour d'expérience (REX) sur lequel s'est appuyée l'étude.

1.1 ANALYSE MACROSCOPIQUE

Les données de ces 323 cas ont fait l'objet d'une analyse macroscopique permettant d'établir un état des lieux des événements « dégagements de fumée ou incendie » sur la période et de dégager des tendances.

Les principales conclusions de cette analyse macroscopique sont :

1. Les incidents « feu-fumée » restent peu nombreux, le taux d'incidents « Dégagement de fumée dans un train ou dans un tunnel » sur le nombre total d'incidents (uniquement les événements en lien avec la sécurité) est de 3,8 % pour les métros et RER et de 0,11 % pour les tramways,
2. Sur les 323 cas étudiés, les incidents « feu-fumée » détectés ou se déroulant en tunnel représentent 16 % et près de 73 % sont détectés ou se déroulent en stations souterraines. Pour les 11 % restants, la localisation de l'incident n'est pas connue,
3. 73,5 % des incidents « feu-fumée » concernent les métros, ce qui peut s'expliquer par le fait que les métros (tous réseaux confondus) concentrent le plus grand nombre de lignes et la production la plus importante en termes de kilomètres commerciaux parcourus,
4. Les réseaux de tramways présentent peu d'incidents « feu-fumée » (0,93 %) proportionnellement au nombre de kilomètres commerciaux parcourus (366 millions de km),
5. Plus des $\frac{3}{4}$ des incidents sont signalés ou ont lieu en gares ou en stations, toutes causes confondues et tous types de TGU confondus,
6. Un peu plus d'un tiers des incidents « feu-fumée » ont une source « externe » au système de transport et près des deux tiers ont une source « interne » au système de transport,
7. Pour les sources « externes » au système les résultats montrent la prédominance de la cause « cigarette » dans la catégorie de lieu « Galerie-armoire ou locaux techniques »,
8. Pour les sources « internes » au système, les résultats montrent la prédominance de la cause « Electrique » notamment dans les catégories de lieu « Matériel roulant » et « Voie-Tunnel-Viaduc ». Le deuxième facteur important est la cause « Négligence », notamment dans les catégories de lieu « Accès-Couloir-Quai » et « Galerie-Armoire ou locaux techniques »,
9. 81 % (260 cas) des incidents ne donnent lieu à aucune évacuation de rame. 2 incidents ne donnent pas l'information. 61 incidents donnent lieu à une évacuation de rame(s). Sur ces 61 cas, 9 incidents présentent une évacuation de rame(s) en interstation en tunnel et 22 incidents une évacuation de rame(s) en interstation aérienne,
10. Les incidents « feu-fumée » recensés sur la période 2005-2014 ont généré peu de victimes : seuls 26 incidents « feu-fumée » sur les 323 cas étudiés ont permis de recenser s'il y a eu des victimes : aucun mort, 19 incidents sans blessés, 6 incidents avec « blessés » (malaises, incommodations, blessés légers). Il est probable que les incidents ne fournissant pas cette information n'ont pour la majorité pas occasionné de victimes.

1.2 ANALYSE PAR ARBRE DE CAUSES

À partir de 16 cas d'incidents « feu-fumée » dont les rapports techniques rédigés après les incidents ont été fournis et sont suffisamment renseignés, il a été possible d'élaborer des arbres de causes permettant de :

- Déterminer les sources types des incidents « feu-fumée »,
- Déterminer les éléments particuliers à prendre en compte (éléments particuliers principaux qui affectent directement l'occurrence de l'évènement « feu-fumée » et les éléments particuliers dits secondaires qui participent à l'aggravation de l'incident « feu-fumée » ou à ses conséquences.

À partir de ces deux types d'analyses, il a été possible de construire un arbre des causes « générique ».

Les seize analyses par arbre de causes ont permis de déterminer que les sources-types d'incidents « feu-fumée » peuvent être une source unique (mécanique, électrique, malveillance ou détritrus) ou une combinaison

de sources (mécanique + électrique, mécanique + infiltration, électrique + infiltration, détritrus + infiltration ou détritrus + électrique).

Sur les cas d'incidents exploitables pour l'étude, l'analyse montre que les éléments particuliers à prendre en compte sont majoritairement des facteurs matériels (projection d'huile, déficience des liaisons radio, ...) et des facteurs organisationnels (multiplicité des documents et des instructions, difficultés de communications entre les intervenants, manque de connaissance des points d'accès pour les secours, complexité des interventions en fonction des territoires, plans non à jour, ...).

À partir de l'ensemble des analyses de la phase 1 (macroscopique et par arbre de causes), un arbre des causes « générique » a pu être élaboré. Il reprend les sources types des incidents « feu-fumée » directement (causes latentes) et ceux intervenant dès lors que

l'incident « feu-fumée » est déclenché (facteurs aggravants).

L'étude montre que les causes des incidents « feu-fumée » ne sont généralement pas liées au non-respect des normes ou de la réglementation, sauf peut-être lorsqu'ils sont liés au non-respect de l'interdiction de fumer dans l'enceinte du TGU (cause « cigarettes »).

L'ensemble de ces résultats permet de dégager des pistes de réduction du risque « feu-fumée » dans les transports guidés urbains, telles qu'une meilleure prévention des risques de défaillances électriques et l'application rigoureuse des procédures de maintenance, de nettoyage régulier des voies, stations, tunnels ou du matériel roulant.

Au regard des résultats obtenus dans cette étude à partir de 323 cas d'incidents « feu-fumée », nous n'avons pas mis en évidence d'accidentologie « feu-fumée » spécifique et significative propre aux tunnels de transports guidés urbains.

Sachant que l'analyse menée en phase 1 concerne des systèmes antérieurs à l'instruction technique de 2005 et aux normes actuellement en vigueur, on peut supposer que les systèmes intégralement conformes aux exigences actuelles présentent un risque « incendie » plus limité.

L'identification des sources-types d'incendie pour le matériel roulant en phase 1 et les données techniques des matériels roulants (source STRMTG) ont permis de déterminer des « localisations-type » de sources d'incendie sur le matériel roulant en vue d'apporter des éléments à la simulation, objet de la phase 3 de la convention confiée au CETU dont l'un des objectifs est d'élaborer des scénarios de simulation.

Les types de configuration identifiés pour le matériel roulant sont les suivants :

- Sous-caisse – bogie moteur,
- Sous-caisse – dispositif de freinage,
- Intérieur caisse,
- Dessus caisse – pantographe,
- Latéral caisse – frotteur,
- Sous-caisse – roue.

Les scénarios retenus par le CETU pour la simulation sont les suivants :

- Scénario 1 : Source en milieu de caisse sous plancher (métro),
- Scénario 2 : Source en extrémité de caisse avec intercirculation élastomère (tramway + métro fer),
- Scénario 3 : Source en extrémité de caisse avec intercirculation et pneus (métro),
- Scénario 4 : Source en toiture proche pantographe (tramway),

- Scénario 5 : Source dans l'espace voyageur – feu de sièges.

Pour les scénarios 1 et 4, une sensibilité à la présence de batteries (matériels roulants hybrides apparaissant sur les réseaux tramway) sera également étudiée.

Ces scénarios font l'objet du rapport de la phase 3 de la convention confiée au CETU [3].

Une analyse plus précise de la source d'incendie « cigarette » a été menée à partir des données fournies pour la phase 1 et de l'expertise du STRMTG sur le sujet. Cette analyse permet de dire qu'en dépit de quelques événements significatifs par leur récurrence et leur portée dans certaines circonstances pour les tunnels existants, la source « cigarette » et ses conséquences apparaissent comme négligeables pour les systèmes conformes à l'instruction technique relative aux tunnels de TGU du 22 novembre 2005. Le risque sera d'autant plus réduit que les lignes seront dotées de façades de quai et que des « pièges à détritres » seront disposés pour protéger les points résiduels où ces derniers pourraient encore s'accumuler et nettoyés régulièrement.

Le nettoyage des zones d'accumulation de détritres ou d'encrassement de toute nature, approprié à leur exposition à ce phénomène et aux conditions réelles d'exploitation ainsi que l'élimination régulière des poussières collectées par les ventilateurs contribuent efficacement à l'élimination des risques.

Le risque incendie concerne l'ensemble du système de TGU, il est pris en compte dès la conception du système dans les dossiers de sécurité participant ainsi à la prévention des incendies. Neuf analyses préliminaires des dangers – APD – (six antérieures et trois postérieures à l'application de la norme EN 45545 (2016)) issues de dossiers de sécurité ou de dossiers préliminaires de sécurité ont été analysées sous l'angle « feu-fumée ».

L'analyse des APD disponibles montre qu'elles sont différemment développées et renseignées. La terminologie utilisée dans ces APD est très fluctuante d'un système de transport à un autre ou d'un constructeur à un autre. La problématique tunnel/station souterraine n'apparaît explicitement que dans certaines APD. Cette analyse montre également que la plupart des causes possibles (sources-type) identifiées dans le REX phase 1 sont présentes dans les APD. Par contre, et c'est bien normal puisque les APD, par essence, listent des dangers potentiels, le champ des APD analysées couvre plus de sources que le REX des systèmes existants. Les différents moyens de couverture ou de réduction du risque « incendie » (exigences de sécurité) identifiés dans les APD fournies sont plus ou moins détaillés et explicites selon le système de transport ou le constructeur. Ils ne diffèrent pas selon que l'APD a été réalisée avant ou après la mise en application de la norme EN 45545. Ils peuvent être regroupés sous trois items différents :

- Fonctions de sécurité,
- Contraintes de conception / réalisation / dimensionnement,
- Procédures d'intégration, d'exploitation et de maintenance.

Une analyse fine, détaillée et harmonisée des sources potentielles d'ignition permettrait d'enrichir les APD des TGU sur ce plan.

L'analyse de neuf incidents « métro » pour lesquels nous disposons d'un rapport d'incident détaillé, a permis, au travers de la construction de scénarios d'évènements pour chacun d'eux, de constater que :

- Il ne se dégage rien de spécifique selon que le métro soit en mode pilote automatique avec conducteur (PA avec conducteur) ou en mode conduite automatique intégrale (CAI),
- La situation dégradée, à savoir le risque d'immobilisation, sans possibilité de repartir, d'une ou

plusieurs rames en tunnel, associé à un évènement « dégagement de fumées ou incendie » apparaît essentiellement dans les cas suivants :

- La cause de l'incident a pour origine un court-circuit ou un flash sur le matériel roulant ou sur l'infrastructure enclenchant la coupure automatique de l'alimentation « haute tension » (HT) entraînant l'immobilisation des rames,
- La coupure de l'alimentation « haute tension » se produit à l'activation d'une poignée d'évacuation par un voyageur ou un personnel à bord (les rames étant en FU),

Dans ces cas, la remise sous tension qui aurait permis d'amener en station les rames arrêtées en interstation n'a pas été possible.

Au regard du faible nombre d'incidents disponibles, ces constats sont à prendre avec beaucoup de précautions.

1.3 SCÉNARIO D'INCIDENT GÉNÉRIQUE

À partir des scénarios d'évènement des neuf incidents « métro », nous avons élaboré un scénario d'incident générique. Son objectif est de permettre de caractériser les situations pouvant conduire au risque d'immobilisation, sans possibilité de repartir, d'une ou plusieurs rames en tunnel, associé à un évènement « dégagement de fumée ou incendie » et au risque d'évacuation en tunnel. Le scénario générique présenté a intégré des hypothèses de situations susceptibles de se produire mais non rencontrées dans l'étude.

Il montre qu'en cas d'incident « feu-fumée », la capacité à rapatrier en station la rame impactée pour permettre son évacuation et à organiser l'arrêt ordonné des autres trains en station est à privilégier, sous réserve d'impossibilité technique empêchant la traction (e.g. coupure de l'énergie de traction non réarmable). C'est généralement la stratégie recherchée par les réseaux de TGU.

ANALYSE DU COMPORTEMENT AU FEU DES MATÉRIELS ROULANTS NEUFS

La définition d'un scénario d'incendie de référence requiert à la fois la connaissance précise des sources potentielles de départ de feu (sources d'ignition), et la connaissance précise des vecteurs de propagation du feu dans un véhicule circulant en tunnel ferroviaire. Or la

grande diversité des matériels roulants ferroviaires en circulation entraîne une certaine hétérogénéité de ces valeurs, qui explique l'absence de références partagées. La recherche d'une référence commune commence donc par un recensement et une analyse des usages actuels dans ce domaine.

2.1 ORIGINE ET DÉVELOPPEMENT DU FEU

Les principaux points de faiblesse des matériels roulants ferroviaires à partir desquels peuvent se déclarer des départs de feu sont : (i) les motrices ou locomotives diesel électriques, (ii) les sièges et banquettes, (iii) les coursives de câbles sous la caisse du système de transport de personnes et (iv) le système de freinage.

Par ailleurs, les facteurs d'aggravation de l'incendie sont essentiellement : (i) la progression de l'incendie de la source principale à d'autres matériaux, induite par le comportement au feu des matériaux constituant le matériel roulant, (ii) l'alimentation en oxygène du feu, induite par les conditions de ventilation et (iii) le retardement de l'évacuation des voyageurs, entraîné par la gestion humaine de l'évènement.

Afin de réduire le risque incendie et ses conséquences, il apparaît nécessaire d'améliorer la robustesse en matière de sécurité des équipements identifiés comme points de faiblesse, de limiter les réactions au feu des matériaux et enfin de définir des procédures d'évacuation capables de faire face à des situations d'urgence. En France, sur les 323 cas d'incidents « feu-fumée »¹ recensés sur la période 2005-2014, près des deux tiers étaient liés à une source interne au système de transport. À noter que cette synthèse ne traite pas spécifiquement de la résistance au feu des matériaux.

Les trois principaux dangers lors d'un incendie sont, par ordre d'apparition, l'opacité, la toxicité et les températures élevées.

En général, le développement d'un feu est représenté par la courbe caractéristique de l'évolution temporelle de son débit calorifique (en kW). On y distingue quatre phases (figure 1) : (I) naissance du feu avec un faible débit calorifique, (II) croissance avec un fort accroissement de la puissance calorifique, (III) plateau où le feu est complètement développé et la puissance maximale est libérée, et (IV) décroissance quand le combustible vient à manquer et que de fait la puissance décroît jusqu'à extinction du feu.

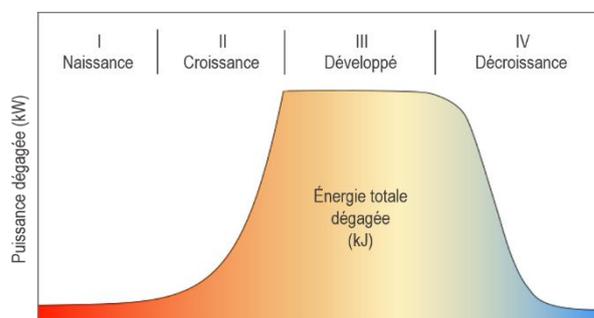


Figure 1 : Étapes de l'évolution caractéristique d'un feu

2.2 CONTEXTE NORMATIF

Bien que non formellement applicable aux TGU, en vertu du décret 2010-814 relatif à la sécurité et l'interopérabilité du système ferroviaire, les STI européennes pour le ferroviaire lourd tendent à définir un ensemble d'exigences et d'objectifs pour le traitement du risque incendie qui ne peuvent être ignorés pour la conception de matériels roulants nouveaux en TGU. Les normes européennes

EN 45545-1, EN 45545-2 et EN 50553, citées par ces STI, deviennent d'application obligatoire et impliquent une nouvelle approche **harmonisée** pour la couverture du risque incendie. Cela passe par une classification des matériels roulants en fonction de leurs catégories d'exploitation (1, 2, 3 et 4) et de conception (A, D, N et S). Ces catégories sont explicitées dans les deux tableaux qui suivent :

¹ Un incident « feu-fumée » désigne soit un dégagement de fumée, soit un feu avec dégagement de fumée, soit un incendie explosion

Catégorie	Signification : véhicules pour une exploitation sur	Système concerné
1	Des infrastructures où les véhicules ferroviaires peuvent être arrêtés dans un délai minimum et où une zone de sécurité est toujours immédiatement accessible	Tramways
2	Des sections souterraines, dans des tunnels et/ou des structures surélevées, avec une évacuation latérale possible et où il y a une gare ou une station de secours, accessible après un court temps de circulation et qui offrent une zone de sécurité aux passagers	Métro ou RER (hors RFN)
3	Des sections souterraines, dans des tunnels et/ou des structures surélevées, avec une évacuation latérale possible et où il y a une gare ou une station de secours, accessible après un long temps de circulation et qui offrent une zone de sécurité aux passagers	TGU non concerné ; concerne uniquement le ferroviaire lourd
4	Des sections souterraines, dans des tunnels et/ou des structures surélevées, sans évacuation latérale possible et où il y a une gare ou une station de secours, accessible après un court temps de circulation et qui offrent une zone de sécurité aux passagers	TGU non concerné ; concerne uniquement le ferroviaire lourd

Tableau 1 : Catégories d'exploitation du matériel roulant (EN 45545-1)

Nota : L'annexe B de l'EN 45545-1 précise les notions de court temps et long temps d'accès en fixant la limite de longueur des tunnels et/ou structures surélevées à 5 km. En dessous de 5 km, la norme considère que le véhicule ferroviaire peut accéder à une gare ou station de secours après un court temps de circulation.

Catégorie	Signification	Système concerné
A	Véhicule constituant un train automatique sans personnel de bord formé pour les procédures d'urgence	Métro
D	Véhicule à deux niveaux	RER
S	Véhicule à places couchées	TGU non concerné
N	Tous les autres véhicules	Tramway, métro, RER

2.3 CHOIX DE LA SOURCE D'IGNITION

Cinq modèles d'allumage (de 1 à 5) représentant différents types de feu sont introduits par la norme EN 45545-1. Le **modèle d'allumage 5** couvre les feux les plus sévères. Il consiste en une source enflammée générant un flux rayonnant de valeur nominale allant de 20 kW/m² à 25 kW/m² appliquée à une surface de 0,7 m² avec une puissance moyenne de sortie de 75 kW durant

une période de 2 minutes suivi immédiatement par un flux rayonnant de valeur nominale allant de 40 kW/m² à 50 kW/m² appliqué ç la même surface de 0,7 m² avec une puissance moyenne de 150 kW durant une période de 8 minutes. C'est ce modèle d'allumage (figure 2) qui est ici retenu pour définir la source d'ignition à la base des différents feux de référence à bâtir.

2.4 CONSTRUCTION DES FEUX DE RÉFÉRENCE

En général, les caractéristiques d'un incendie sont :

- Le profil du débit calorifique,
- Le profil de température,
- Les débits et volumes estimés des fumées (estimation de la visibilité moyenne),
- Les taux de production de gaz toxiques émis.

2.4.1 Données issues d'essais expérimentaux

De la recherche bibliographique menée sur les essais incendie de matériel roulant, il ressort une grande diversité de types d'essais réalisés d'une part, mais également de résultats obtenus pour la puissance sdégagée par un matériel roulant d'autre part. L'ordre de grandeur des débits calorifiques obtenus pour des incendies de voitures passagers varie entre 5 et 30 MW suivant le type d'essai, le type de matériel roulant considéré ou le type de source d'allumage retenue.

Les essais expérimentaux de comportement au feu des matériaux à l'**échelle réduite** et dans des enceintes confinées normalisées ont l'avantage d'améliorer l'estimation de la puissance calorifique dégagée lors d'un incendie en prenant en compte l'interaction entre les matériaux. Dans ces essais à échelle réduite, le comportement au feu des éléments ferroviaires est généralement testé par l'exposition de ces matériaux à une source d'ignition de faible puissance représentative d'un feu probable de poubelle ou de bagage d'un usager. Il en résulte des recommandations en matière de comportement au feu et de choix de matériaux, spécifiées dans des normes ferroviaires régulièrement révisées, afin de limiter à la fois le potentiel calorifique et la propagation de l'incendie.

Seuls des essais incendie de matériel roulant à **échelle réelle** permettent de recréer des conditions réalistes d'incendie, mais leur reproductibilité est freinée par leurs coûts prohibitifs. À travers les essais incendie en grandeur réelle, il apparaît que les conditions de ventilation influencent fortement le développement de l'incendie. Si la ventilation est importante et qu'une vitesse supérieure à 2 m/s concourt à alimenter l'incendie en air frais, alors l'ordre de grandeur des puissances calorifiques attendues peut doubler. Cependant, la durée de l'incendie dans ces conditions est réduite par l'épuisement plus rapide de la charge combustible. Les sources utilisées lors de ces essais à l'échelle 1:1 jouent également un rôle important dans le niveau de puissance développé.

Mais le facteur qui contribue le plus à la variabilité des niveaux de puissance enregistrés reste somme toute l'âge du matériel roulant considéré et implicitement la norme de réaction au feu à laquelle il répond. En effet, plus le matériel roulant est ancien et plus la puissance dégagée lors des essais est importante. Pour une voiture passagers d'un matériel ancien, cette puissance peut être évaluée entre 20 et 30 MW en fonction des

conditions opérationnelles des essais, tandis que pour un matériel plus récent, le niveau de puissance se situe plutôt entre 5 et 10 MW.

2.4.2 Données issues d'études numériques

En l'état actuel des connaissances sur la dégradation thermique des matériaux et des capacités des logiciels de calcul CFD, il paraît encore très ambitieux de pouvoir prédire le développement d'un feu par la seule simulation numérique. Dans une approche de construction de feux de référence, le recours à la simulation permet uniquement d'estimer la puissance maximale dégagée d'un élément. La principale difficulté pour les codes de simulations numériques réside en la prise en compte de la propagation d'un foyer primaire, c'est-à-dire source d'ignition et premier élément en contact, vers un foyer secondaire avec allumage des éléments aux environs.

2.4.3 Proposition de feux de référence

La construction des feux de référence doit s'appuyer sur une approche combinant à la fois les enseignements des essais réalisés et les résultats de simulations numériques, le tout dans le cadre d'une méthode théorique basée sur l'estimation des potentiels calorifiques. L'approche retenue est d'additionner les énergies libérées par les différents éléments en contact avec la source, cette dernière étant représentée par le modèle d'allumage 5.

Dans l'optique de l'établissement d'un feu de référence permettant d'analyser les conditions d'évacuation des usagers et d'intervention des secours, la puissance maximale dégagée en pic par l'incendie ne constitue pas une variable essentielle du feu de référence.

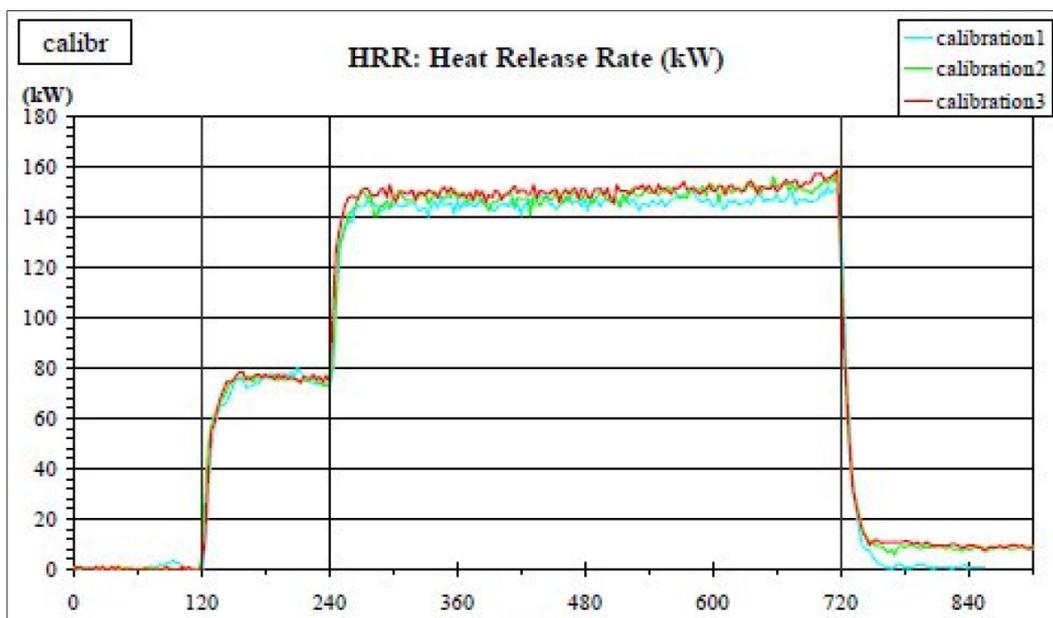


Figure 2 : Puissance dégagée par une source correspondant au modèle d'allumage 5

Pour estimer les niveaux de doses atteints pour les gaz toxiques et la température, la valeur moyenne de puissance ainsi que le taux de croissance du foyer sont les variables les plus représentatives de ces émissions.

À l'issue de cette phase de l'étude, compte tenu du contexte exposé plus haut, plusieurs termes source incendie sont proposés en fonction des matériels roulants et de la localisation du départ de l'événement « feu-fumée ». Ces propositions sont synthétisées sous forme graphique (figure 3).

Il a été retenu le principe d'une montée en puissance linéaire avec stabilisation sur un plateau de puissance. La durée du plateau est ajustée en fonction des niveaux d'énergie susceptibles d'être atteints pour le scénario considéré. L'approche retenue pour déterminer la valeur du plateau est

d'additionner les énergies libérées par les différents éléments en contact avec la source d'ignition, cette dernière étant représentée par le modèle d'allumage 5.

Dans la figure 3, l'incendie de référence « Pneu et intercirculation » (courbe orange) correspond à la cinétique suivante : après une montée linéaire en puissance sur 10 min, on assiste à une stabilisation de la puissance sur un premier palier à 2 MW lié à la combustion du pneumatique. Au bout de 20 min après allumage, alors que la combustion du pneumatique est moins intense, le feu se propage à l'intercirculation qui contribue à hauteur de 1 MW environ pendant 10 min. Enfin l'extinction se produit au bout de 45 min après allumage. Ce foyer génère une énergie totale d'environ 2400 MJ.

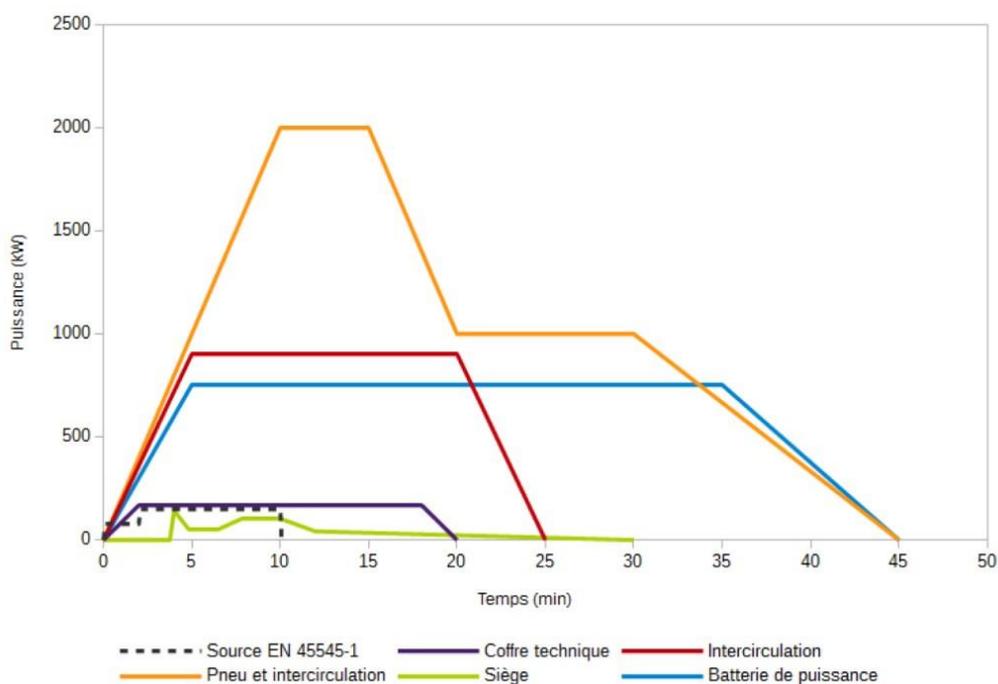


Figure 3 : Proposition de feux de référence pour différentes situations

IDENTIFICATION DES RISQUES ENCOURUS EN CAS D'ÉVÈNEMENT « FEU-FUMÉE »

3.1 SCÉNARIOS ÉTUDIÉS

On s'intéresse à des événements pouvant se produire soit en tunnel, soit en station (ERP de type GA²). Le principe du désenfumage de ces deux espaces doit répondre à deux réglementations différentes : l'IT STPG pour les tunnels et l'arrêté du 24 décembre 2007 portant approbation des règles de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les gares, ainsi que les dispositions constructives de l'IT 246 pour les stations. En cas de déclenchement d'un événement « feu-fumée », la phase 3 a montré que les enjeux en matière de risque incendie reposent principalement, outre les matériaux extérieurs au système TGU, sur les matériels roulant à pneu et sur la nouvelle technologie d'hybridation par batteries électriques de puissance.

Afin de couvrir ces différents cas, six scénarios ont été modélisés :

- Scénario 1 : arrêt en tunnel, source pneu
- Scénario 2 : arrêt en tunnel, source batterie en position haute
- Scénario 3 : arrêt en tunnel, source batterie en position basse
- Scénario 4 : arrêt en station, source pneu, et propagation du feu
- Scénario 5 : arrêt en station, source batterie en position haute, et propagation du feu
- Scénario 6 : arrêt en station, source batterie en position basse, et propagation du feu

3.2 CRITÈRES QUANTITATIFS D'ANALYSE

Le tableau qui suit consigne l'ensemble des valeurs qui seront utilisées pour l'analyse des conditions ambiantes par la suite :

	Zone enfumée	Zone dangereuse	Zone létale
Température	inférieure à 50 °C	entre 50 et 80 °C	supérieure à 80 °C
Flux radiatif	inférieur à 2 kW/m ²	inférieur à 2 kW/m ²	supérieur à 2 kW/m ²
Concentration en CO	entre 400 et 1200 ppm	entre 1200 et 3000 ppm	supérieur à 3000 ppm
Distance de visibilité	entre 5 et 20 m	inférieure à 5 m	inférieure à 5 m

Tableau 2 : Valeurs retenues des critères d'analyse des conditions de tenabilité

3.3 MÉTHODE ET HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION

L'outil retenu est le logiciel FDS version 6, particulièrement adapté aux problématiques d'incendie en milieu confiné. Il s'agit d'un modèle numérique tridimensionnel de type CFD, auquel est couplé un modèle de combustion. FDS permet de définir précisément les caractéristiques thermiques des parois afin de calculer les échanges thermiques pouvant s'y produire.

3.3.1 Conditions aux limites

La ventilation à l'intérieur du domaine de calcul est déterminée par les conditions aux limites imposées à ses bornes, conditions qui peuvent être fournies soit en vitesse, soit en pression.

Pour les scénarios en tunnel, il a été retenu comme condition aux limites une vitesse de 1,5 m/s en amont du train incendié, qui est la vitesse minimale de balayage imposée par l'IT STPG.

² Selon l'arrêté du 25 juin 1980 portant approbation des dispositions générales du règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public (ERP), Ministère de l'Intérieur.

Pour les scénarios en station, il a été retenu une vitesse de 1 m/s au niveau des ouvertures en partie haute (trappes de désenfumage), permettant de modéliser une extraction totale de 40 m³/s dans le volume considéré, satisfaisant le débit équivalent à 15 volumes par heure demandé par les règles de sécurité pour les ERP de type GA. Un balayage entrant au niveau des tunnels adjacents a également été imposé (débit de 19,5 m³/s maintenu sur chacune des deux faces).

Les équipements présents dans ces espaces n'ont pas été reproduits afin de ne pas augmenter inutilement le temps de calcul au vu du changement minime induit sur les résultats.

3.3.2 Foyers et termes source incendie

Pour la source pneu, le foyer est de dimensions 0,6 m * 0,3 m * 0,6 m (longueur * largeur * hauteur). La surface totale sur laquelle est émise la puissance est de 0,72 m² et le débit calorifique par unité de surface maximum imposé est alors de 2778 kW/m². Le terme source retenu pour un feu de source pneu est la courbe orange de la figure 2 pour le scénario 1 (arrêt tunnel), et une combinaison pour le scénario 4 (arrêt station et propagation du feu).

Pour la source hybride, on considère deux localisations différentes : en partie haute de la caisse et en partie basse. Pour la première localisation, la batterie est considérée comme un parallélépipède de dimensions 2 m * 1,75 m * 0,5 m, la surface totale sur laquelle est émise la puissance est de 6,625 m² et le débit calorifique par unité de surface maximum imposé est de 115 kW/m². En cas de localisation en sous caisse, la batterie est modélisée comme un parallélépipède de dimensions 2 m * 2,75 m * 0,5 m, la surface totale sur laquelle est émise la puissance est de 2,625 m² et le débit calorifique par unité de surface maximum imposé est de 290 kW/m². Le terme source retenu pour une source hybride est la courbe bleue de la figure 2 pour les scénarios 2 et 3 (arrêt tunnel), et une combinaison pour les scénarios 5 et 6 (arrêt station et propagation du feu).

3.3.3 Conditions initiales

L'effet de pistonement n'est pas pris en compte (vitesse initiale nulle dans l'espace considéré) car il existe une telle variabilité de vitesses d'exploitation qu'il n'est pas possible de définir une valeur de pistonement représentative. De plus, le pistonement peut avoir un effet bénéfique en poussant les fumées dans le sens recherché.

3.3.4 Chronologie

Dans tous les scénarios, t = 0 s correspond à l'arrêt du train et au début du déclenchement du feu. Dans quatre scénarios sur les six, le désenfumage est déclenché à t = 60 secondes (délai de détection de l'événement par l'opérateur), et considéré comme pleinement opérationnel à t = 180 s. Dans les scénarios 2 et 3 (arrêt en tunnel, source batterie), le désenfumage est déclenché 600 secondes après le départ du feu, afin d'observer durant les premières minutes les phénomènes pouvant limiter la tenabilité et les capacités d'évacuation des usagers et ainsi de mieux comprendre leur impact et la couverture possible du risque.

Dans les trois scénarios d'arrêt en station, le feu se propage respectivement au pneumatique du train arrêté en station sur la voie opposée à t = 300 s pour le scénario 4, et à la batterie électrique du train arrêté en station sur la voie opposée à t = 600 s pour les scénarios 5 et 6.

3.3.5 Stratégie de désenfumage

Pour les scénarios d'arrêt en tunnel (scénarios 1 à 3), la stratégie de désenfumage est longitudinale et la vitesse de ventilation est fixée à 1,5 m/s dans le sens du trafic. Pour les scénarios avec arrêt en station (scénarios 4 à 6), la stratégie de désenfumage est une extraction de 40 m³/s par les trappes et soufflage à 39 m³/s par les tunnels adjacents.

3.4 RÉSULTATS DES MODÉLISATIONS POUR LES SIX SCÉNARIOS

Résultats des simulations	Analyse des conditions ambiantes
Scénario 1 : arrêt tunnel, source pneu	
<p>L'activation rapide de la ventilation impose un courant d'air longitudinal d'au moins 1,5 m/s en tout point du domaine de calcul. Ce courant d'air est accéléré au niveau du train, qui obstrue une partie de la section du tunnel. On observe alors des vitesses supérieures à 2 m/s au niveau de la voie opposée. Ces vitesses ne gênent pas l'évacuation des personnes ni l'intervention des secours.</p> <p>Le niveau de ventilation imposé ne permet pas d'observer de stratification de la couche de fumée, l'ensemble des fumées produites par l'incendie étant</p>	<p>À l'amont du foyer, les conditions sont favorables pour l'évacuation des usagers et l'intervention des services de secours.</p> <p>À l'aval du foyer, les conditions de tenabilité sont plus difficiles : visibilité dégradée entre t = 5 min et t = 30 min (cf. figure 5 à t = 10 min).</p> <p>Ce cas met bien en évidence l'importance de la connaissance du sens de la ventilation. Cette donnée est essentielle pour permettre une évacuation des usagers vers la zone amont qui leur assure une protection face aux effets du feu, mais aussi pour les</p>

repoussées vers l'aval (cf. figure 4). Le mélange des fumées à l'aval sous l'effet du désenfumage induit une dilution de la température et de la concentration en CO, mais une répartition homogène des fumées dans l'ensemble de la section.

services de secours dont les actions pourraient être ralenties par le manque de visibilité. Pour des réseaux entièrement automatisés, se pose la question de la transmission de cette consigne d'évacuation.

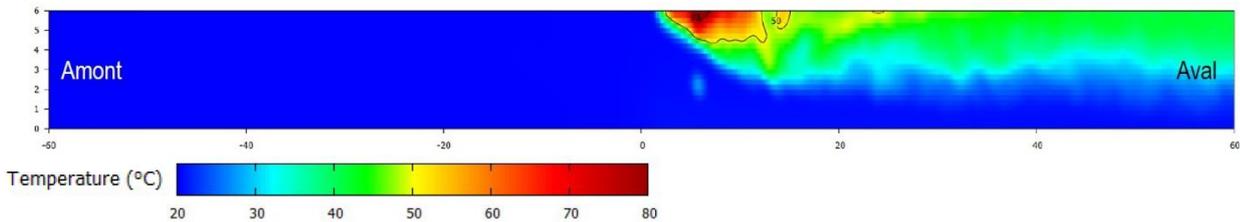


Figure 4 : Température à $t = 600$ s dans le plan $y = 2$ m (voie opposée) dans la zone foyer

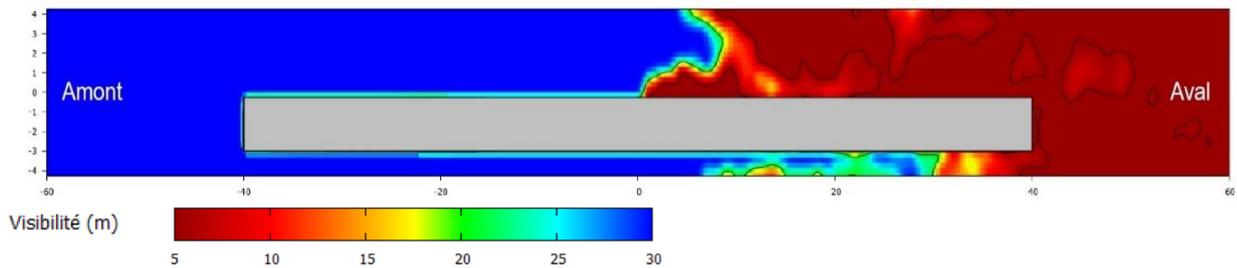


Figure 5 : Visibilité à $t = 600$ s dans le plan $z = 3$ m dans la zone de foyer

Résultats des simulations	Analyse des conditions ambiantes
Scénarios 2 et 3 : arrêt tunnel, source batterie	
<p><i>Rappel : le choix est fait dans ces scénarios d'activer la ventilation 10 minutes après le départ du feu, dans une volonté d'observer, sur les premières minutes, les phénomènes pouvant limiter la tenabilité et les capacités d'évacuation des usages.</i></p> <p>Les 10 premières minutes voient le développement d'une couche de fumées stratifiées de part et d'autre du foyer. Pour le <u>scénario avec source en partie haute</u>, cette couche n'est pas de nature à avoir un impact sur les conditions pour les usagers et les services de secours, les niveaux de température (autour des 35 °C) et de concentration en CO étant très en dessous des limites de tenabilité. Pour le <u>scénario avec source en partie basse</u>, on remarque qu'une zone de températures élevées (supérieures à 60 °C) persiste dans la limite de quelques mètres au voisinage immédiat du foyer. Sans courant d'air longitudinal, ces niveaux de températures pourraient permettre la propagation de l'incendie principal. Ce risque devient très limité dès activation du système de désenfumage. <u>Dans les deux cas</u>, dès l'activation du système de désenfumage, l'ensemble des fumées se retrouvent repoussées vers l'aval du foyer. Le courant d'air longitudinal s'établit en moyenne à une valeur supérieure à 1,5 m/s en toutes sections transversales du tunnel. Comme vu dans le cas d'un feu de pneumatique, ce niveau de vitesse est supérieur à la vitesse critique pour la puissance développée par le foyer de batterie électrique.</p>	<p><u>Scénario source batterie en partie haute.</u> Pendant toute la durée de simulation, les conditions ambiantes restent favorables à l'amont du foyer. Malgré la présence d'une couche de fumée stratifiée pendant les 10 premières minutes, à hauteur d'homme les valeurs limite des critères d'analyse ne sont pas atteintes. La visibilité n'est également pas engagée à hauteur d'homme sur le cheminement d'évacuation. La localisation de la source en partie haute du matériel roulant et sa puissance limite expliquent ces constatations. A l'aval, la situation est identique jusqu'à $t = 10$ min. Après, les effets de balayage des fumées par le système de ventilation se font sentir et la stratification des fumées est perdue. Ce phénomène s'accompagne d'une dilution de la température et des concentrations en CO. Seule la visibilité pourrait être incapacitante par endroits à l'aval du feu, toutefois de façon bien moindre que pour les cas avec une source pneu.</p> <p><u>Scénario source batterie en partie basse.</u> Pas de différence fondamentale avec le scénario précédent pour les conditions de température – hormis au voisinage immédiat du foyer – et de concentration en CO. Pour les conditions de visibilité en revanche, la génération de particules de suies par le foyer côté piédroit conduit à la présence d'une zone de visibilité à hauteur d'homme comprise entre 10 et 15 m de part et d'autre du foyer, avant le déclenchement du désenfumage. Une fois le désenfumage activé, il apparaît que la visibilité est plus dégradée sur le cheminement d'évacuation que côté voie opposée. On observe ainsi des conditions qui sont proches du cas de la source pneu.</p>

Résultats des simulations	Analyse des conditions ambiantes
Scénario 4 : arrêt station, source pneu	
<p>Une nette stratification des fumées s'établit à l'activation du désenfumage. Cette stratification reste stable, étant maintenue par les effets conjugués de l'extraction en partie haute, de l'apport d'air frais par les tunnels adjacents et des forces de flottabilité inhérentes au développement de l'incendie.</p> <p>Les niveaux de température sont importants et de nature à communiquer le feu dans un rayon de quelques mètres (entre 1,5 et 2 m) autour du foyer initial. Au-delà de cette distance en longitudinal, la température et le flux radiatif ne sont plus suffisamment élevés pour permettre l'allumage d'un autre foyer. Ainsi, si la rame arrêtée sur la voie opposée ne présente pas d'éléments combustibles (intercirculations ou pneus) dans cette zone, il est peu probable que l'incendie se développe au-delà du foyer initial sur la rame sinistrée.</p>	<p>Au niveau de la zone des quais, les conditions à hauteur d'homme en température et concentration en CO sont favorables. Seule la visibilité pourrait ralentir l'évacuation des usagers. A noter que le désenfumage retenu fait l'hypothèse que l'évacuation de la station et l'accès des secours se font latéralement depuis les quais. Les conditions en partie haute de la station ne sont en effet pas compatibles avec une évacuation ou un accès des secours par des escaliers mécaniques depuis les niveaux supérieurs. Après 10 minutes d'incendie, on note une perte notable de visibilité au niveau des parois en limite de quais. Cette perte de visibilité s'étend au cours du temps à l'ensemble des quais avant de décroître sous l'effet de l'extraction et du déclin de l'incendie.</p>

Résultats des simulations	Analyse des conditions ambiantes
Scénarios 5 et 6 : arrêt station, source batterie	
<p>Comme pour le cas de la source pneu, une nette stratification des fumées s'établit. La concentration en CO est de l'ordre de 100 ppm dans cette couche et les températures y sont en moyenne de 40 °C.</p> <p><u>Pour des batteries en partie haute</u>, l'hypothèse d'un allumage d'un deuxième foyer au bout de 10 min n'est pas complètement valide au regard des niveaux de température atteints sur la partie haute de la seconde rame. Toutefois, dans un but illustratif, ce scénario met en évidence l'efficacité du désenfumage pour limiter les effets du feu au niveau des quais de la station.</p> <p><u>Pour des batteries en partie basse</u>, cette hypothèse est justifiée, les températures sous la caisse se situant dans la plage 120 – 150 °C dès le début de l'incendie. Ce niveau se maintient pendant toute la durée de combustion du foyer initial. Longitudinalement, en revanche, ces températures élevées ne s'observent que dans un rayon d'au plus 2 m autour du foyer. Comme pour la source pneu, il est peu probable que le foyer initial se propage à la rame en vis-à-vis sauf à rencontrer un élément pouvant contribuer à son développement.</p>	<p>Les niveaux de température et de concentration en CO générés par le foyer ne sont pas de nature à engager la tenabilité des usagers présents sur les quais de la station. Les conditions d'évacuation au regard de ces deux paramètres sont donc favorables pendant toute la durée du sinistre. La visibilité à hauteur d'homme est quant à elle fortement dégradée. En effet, l'extraction des fumées en partie haute conduit à un certain poinçonnement de la couche d'air frais située proche du sol ce qui engendre des phénomènes de diffusion des fines particules de suies, principal facteur de l'opacité des fumées.</p> <p><u>Pour le scénario batterie en partie haute</u>, la perte de visibilité est limitée à hauteur d'homme et ne devrait pas trop toucher les usagers en situation d'évacuation.</p> <p><u>Pour le scénario batterie en partie basse</u>, la localisation de la source accentue le phénomène d'obscurcissement dû aux suies produites par l'incendie. Dès t = 300 s, on observe des remontées de fumées en extrémité du matériel roulant sinistré. L'écoulement se trouve canalisé entre le nez de quai et la caisse sur toute la longueur du train. La visibilité reste dégradée jusqu'à 1 heure après le début de l'incendie. Pour ce scénario, les enjeux de guidage de l'évacuation des usagers sont essentiels, bien que les conditions soient tenables par ailleurs.</p>

PRINCIPALES CONCLUSIONS

La température et les concentrations en CO sont rarement un enjeu pour l'évacuation des usagers ; seule la visibilité peut être fortement dégradée à hauteur d'homme à l'aval du foyer. Des matériels roulants hybrides pourraient cependant engendrer des puissances plus importantes.

Des mesures assurant le maintien de stratification des fumées pourraient présenter un intérêt pour assurer la bonne gestion de l'évacuation des usagers et limiter les risques de panique. La transmission en consigne d'évacuation – aussi bien aux usagers qu'aux services de secours – du sens d'évacuation par rapport au balayage, peut de ce point de vue permettre de faciliter l'intervention des secours et l'évacuation des usagers. Enfin, un balisage lumineux au sol pourrait faciliter le guidage des usagers sur les cheminements latéraux.

La modélisation n'a pas mis en évidence de risque significatif de communication du feu à un autre train en vis-à-vis (températures assez élevées observées dans un rayon d'au plus 2 m autour du foyer initial), sauf à rencontrer un élément pouvant contribuer à son développement.

La pertinence du référentiel réglementaire actuel et notamment de la norme EN 45 545, dans la couverture du risque incendie en TGU (propagation, évacuation des usagers, intervention des secours) tend à être démontrée par cette étude, même s'il conviendrait au cas par cas de tenir compte des points d'attention susvisés.

L'étude n'a toutefois pas pris en compte d'autres scénarios d'événements « feu-fumée », tels que notamment la présence de bagages en nombre ou d'éléments extérieurs au système susceptibles de générer un niveau de puissance plus conséquent, un risque de propagation et d'émissions toxiques.

CONTRIBUTEURS

Le CETU, l'IFSTTAR, et le STRMTG ont participé à l'élaboration de ce document.

Centre d'Études des Tunnels
25, avenue François Mitterrand
69674 BRON – FRANCE
Tél. 33 (0)4 72 14 34 00
Fax. 33 (0)4 72 14 34 30
cetu@developpement-durable.gouv.fr

