



# Feux de référence en tunnel de transports guidés urbains

*Synthèse des phases 3 et 4*



MINISTÈRE  
DE LA TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE  
ET SOLIDAIRE

Centre d'Études des Tunnels

[www.cetu.developpement-durable.gouv.fr](http://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr)

## ÉTUDE SUR LES FEUX DE RÉFÉRENCE EN TUNNEL DE TRANSPORTS GUIDÉS URBAINS

### Synthèse des phases 3 et 4

#### ANALYSE DU COMPORTEMENT AU FEU DES MATÉRIELS ROULANTS NEUFS – PHASE 3

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.

#### 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 »<sup>1</sup> 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.

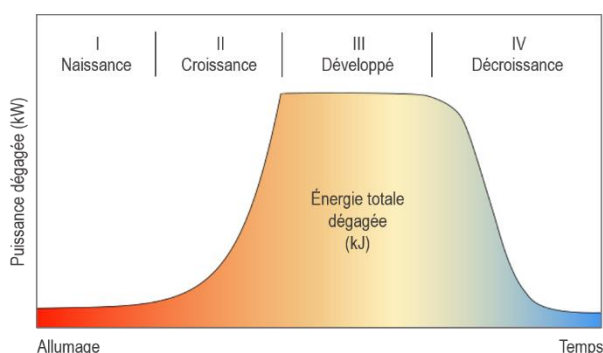


Figure 1 : Étapes de l'évolution caractéristique d'un feu

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.

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

## 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 :

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, <b>avec</b> une évacuation latérale possible et où il y a une gare ou une station de secours, accessible après un <b>court</b> 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, <b>avec</b> une évacuation latérale possible et où il y a une gare ou une station de secours, accessible après un <b>long</b> 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, <b>sans</b> 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

Tableau 2 : Catégories de conception du matériel roulant (EN 45545-1)

## 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/m<sup>2</sup> à 25 kW/m<sup>2</sup> appliquée à une surface de 0,7 m<sup>2</sup> 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/m<sup>2</sup> à 50 kW/m<sup>2</sup> appliqué ç la même surface de 0,7 m<sup>2</sup> 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.

## 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

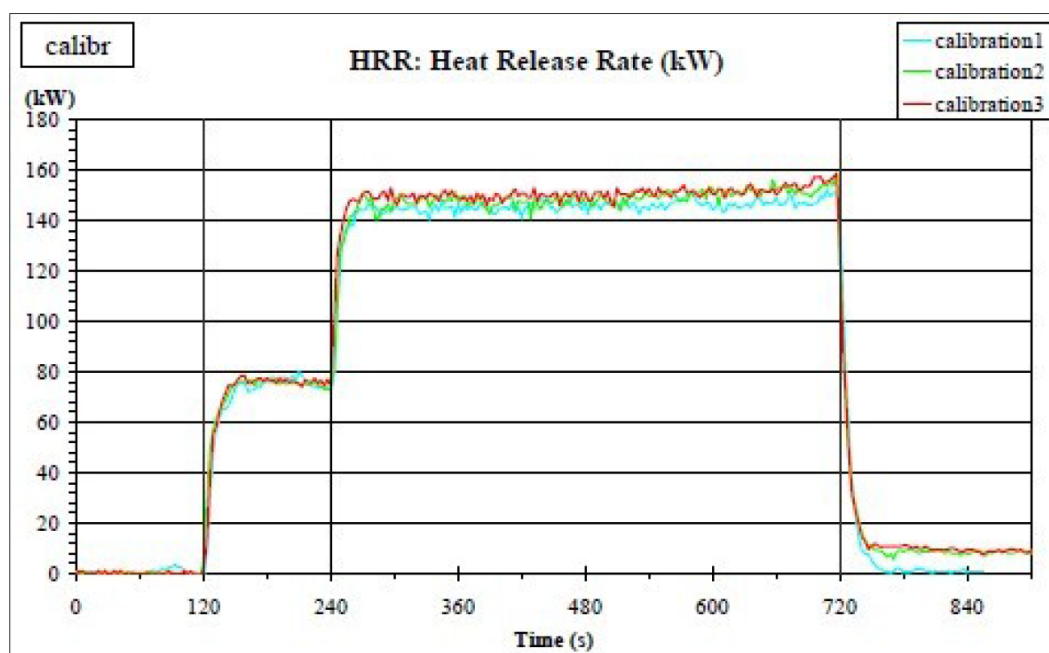


Figure 2 : Puissance dégagée par une source correspondant au modèle d'allumage 5

### 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 dégagée 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.

#### *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.

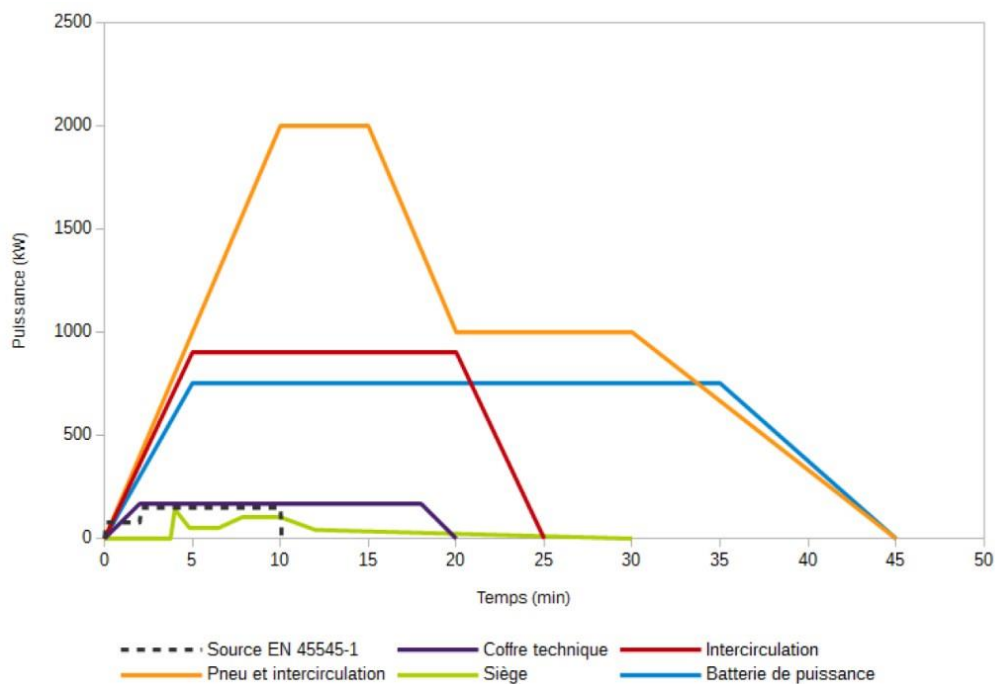
#### *Proposition de feux de référence*

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. 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 2).

**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 2, 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.

## IDENTIFICATION PAR MODÉLISATION FDS DES RISQUES ENCOURUS PAR LES USAGERS ET LES SERVICES DE SECOURS EN CAS D'ÉVÈNEMENT « FEU-FUMÉE » – PHASE 4

### Scénarios étudiés

On s'intéresse à des événements pouvant se produire soit en tunnel, soit en station (ERP de type GA<sup>2</sup>). 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

### 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 <sup>2</sup>	inférieur à 2 kW/m <sup>2</sup>	supérieur à 2 kW/m <sup>2</sup>
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 3 : Valeurs retenues des critères d'analyse des conditions de tenabilité

### 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.

#### 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.

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 m<sup>3</sup>/s dans le volume considéré, satisfaisant le débit équivalent à 15 volumes par heure demandé par les règles de

<sup>2</sup> 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.

sécurité pour les ERP de type GA. Un balayage entrant au niveau des tunnels adjacents a également été imposé (débit de 19,5 m<sup>3</sup>/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.

#### *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 m<sup>2</sup> et le débit calorifique par unité de surface maximum imposé est alors de 2778 kW/m<sup>2</sup>. 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 m<sup>2</sup> et le débit calorifique par unité de surface maximum imposé est de 115 kW/m<sup>2</sup>. 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 m<sup>2</sup> et le débit calorifique par unité de surface maximum imposé est de 290 kW/m<sup>2</sup>. 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).

#### *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.

#### *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.

#### *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 m<sup>3</sup>/s par les trappes et soufflage à 39 m<sup>3</sup>/s par les tunnels adjacents.



## Résultats des modélisations pour les six scénarios

Résultats des simulations	Analyse des conditions ambiantes
<b>Scénario 1 : arrêt tunnel, source pneu</b>	
<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 repoussées vers l'aval (cf. Figure 3). 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.</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 <math>t = 5</math> min et <math>t = 30</math> min (cf. Figure 4 à <math>t = 10</math> min).</p> <p>Ce cas met bien en évidence l'importance de la <b>connaissance du sens de la ventilation</b>. 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 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.</p>

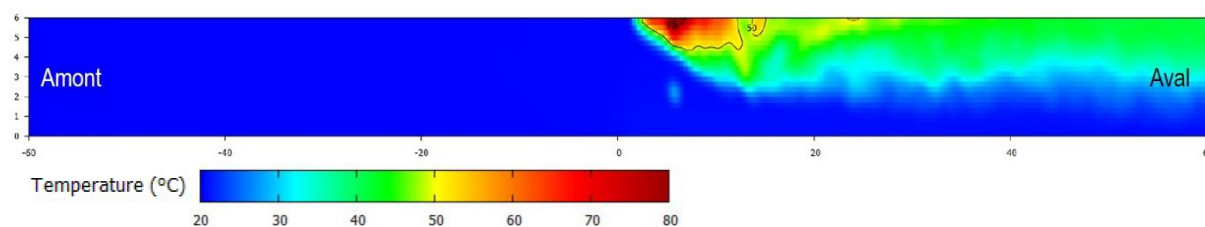


Figure 3 : Température à  $t = 600$  s dans le plan  $y = 2$  m (voie opposée) dans la zone foyer

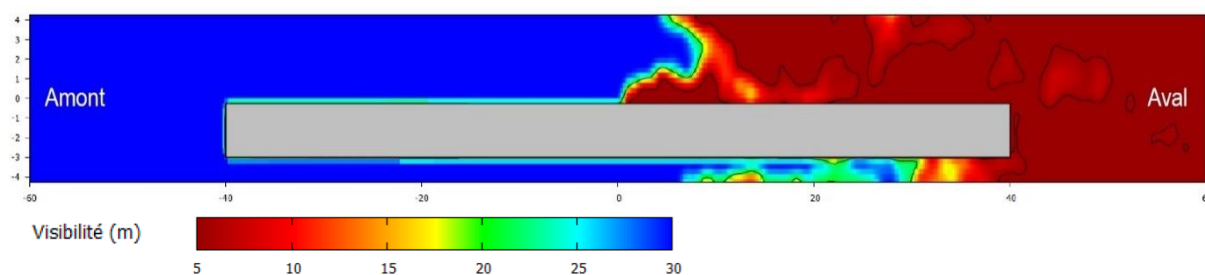


Figure 4 : Visibilité à  $t = 600$  s dans le plan  $z = 3$  m dans la zone de foyer

Résultats des simulations	Analyse des conditions ambiantes
<b>Scénarios 2 et 3 : arrêt tunnel, source batterie</b>	
<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</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 <math>t = 10</math> min. Après, les effets de balayage des fumées par</p>

<p>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.</p> <p><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>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
<b>Scénario 4 : arrêt station, source pneu</b>	
<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
<b>Scénarios 5 et 6 : arrêt station, source batterie</b>	
<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</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</p>

<p>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>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, <b>les enjeux de guidage de l'évacuation des usagers sont essentiels</b>, bien que les conditions soient tenables par ailleurs</p>
---	--

## SYNTHÈSE DES 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.