

# Extensions projetées dans le cadre du Plan National de Mobilité 2035

Marché relatif au tronçon « Route d'Arlon » (CHL / ETOILE)

## ÉTUDES D'AVANT PROJET SOMMAIRE - APS

VOLUME D – Ouvrages d'art (tranchée couverte et trémies ouvertes)

5 - Notice de simulation de désenfumage



Groupement Momentané Conjoint



Indice	Date	Modification
A	18.03.2025	Version initiale

---

# Sommaire

<b>1</b>	<b>GENERALITES.....</b>	<b>7</b>
1.1	Objet du document.....	7
1.2	Documents de référence.....	7
<b>2</b>	<b>PRESENTATION DE L'OUVRAGE.....</b>	<b>8</b>
2.1	Géométrie .....	8
2.2	Évacuation des usagers .....	9
2.3	Éclairage .....	10
2.4	Système de désenfumage .....	10
2.5	Surveillance de l'ouvrage .....	11
2.5.1	Communication entre le PCC – le conducteur – les voyageurs .....	11
2.5.2	Communication entre le PCC et les autorités .....	11
2.6	Accès et moyens de secours .....	11
2.6.1	Localisation et caractéristiques des accès de secours .....	11
2.6.2	Équipements d'alimentation en eau pour l'incendie.....	11
<b>3</b>	<b>DÉFINITION DES SCÉNARIOS INCENDIE .....</b>	<b>12</b>
3.1	Synthèse du système de ventilation .....	12
3.2	Conditions aérauliques.....	12
3.2.1	Conditions aux limites .....	12
3.2.2	Conditions initiales .....	12
3.3	Termes sources.....	12
3.4	Hypothèses de mise en sécurité.....	14
3.5	Hypothèses relatives à l'évacuation des usagers.....	15
3.6	Autres grandeurs .....	15
3.7	Scénarios proposés .....	15
3.8	Critères de performance pour estimer les conditions de tenabilité .....	17
3.9	Outils utilisés.....	19
3.10	Modélisation de l'ouvrage .....	19
<b>4</b>	<b>ANALYSE DES RÉSULTATS DES SIMULATIONS NUMÉRIQUES .....</b>	<b>21</b>
4.1	Scénario 1 : incendie de 1 MW en début de rame, entre la station CHL et l'issue de secours21	
4.1.1	Présentation du scénario .....	21

4.1.2	Déroulement du scénario .....	22
4.1.3	Analyse des conditions d'évacuation .....	23
<b>4.2</b>	<b>Scénario 2 : incendie de 1 MW en milieu de rame, entre la station CHL et l'issue de secours</b>	<b>26</b>
4.2.1	Présentation du scénario .....	26
4.2.2	Déroulement du scénario .....	27
4.2.3	Analyse des conditions d'évacuation .....	28
<b>4.3</b>	<b>Scénario 3 : incendie de 1 MW en milieu de rame, entre la station WUNNQUARTIER et l'issue de secours</b>	<b>31</b>
4.3.1	Présentation du scénario .....	31
4.3.2	Déroulement du scénario .....	32
4.3.3	Analyse des conditions d'évacuation .....	33
<b>4.4</b>	<b>Scénario 4 : incendie de 1 MW en tête de rame, entre la station WUNNQUARTIER et l'issue de secours</b>	<b>36</b>
4.4.1	Présentation du scénario .....	36
4.4.2	Déroulement du scénario .....	37
4.4.3	Analyse des conditions d'évacuation .....	38
<b>4.5</b>	<b>Scénario 5 : incendie de 10 MW sur toute la rame, entre la station CHL et l'issue de secours</b>	<b>41</b>
4.5.1	Présentation du scénario .....	41
4.5.2	Déroulement du scénario .....	42
4.5.3	Analyse des conditions d'évacuation .....	43
<b>4.6</b>	<b>Scénario 6 : incendie de 10 MW sur toute la rame, entre la station WUNNQUARTIER et l'issue de secours</b>	<b>47</b>
4.6.1	Présentation du scénario .....	47
4.6.2	Déroulement du scénario .....	48
4.6.3	Analyse des conditions d'évacuation .....	49
<b>5</b>	<b>SYNTHÈSE DES SCÉNARIOS</b>	<b>53</b>
5.1	Synthèse du scénario 1 .....	53
5.2	Synthèse du scénario 2 .....	53
5.3	Synthèse du scénario 3 .....	54
5.4	Synthèse du scénario 4 .....	54
5.5	Synthèse du scénario 5 .....	55
5.6	Synthèse du scénario 6 .....	55
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONS ET RECOMMANDATION</b>	<b>56</b>

<b>6.1</b>	<b>Conclusions des scénarios .....</b>	<b>56</b>
<b>6.2</b>	<b>Recommandation .....</b>	<b>56</b>
<b>7</b>	<b>ANNEXES.....</b>	<b>57</b>

## Table des figures

Figure 1 - Plan de repérage du passage en tunnel à l'étude .....	7
Figure 2 - Coupe type du tunnel .....	8
Figure 3 - Représentation de la partie tunnel .....	8
Figure 4 - Profil en long du tunnel .....	9
Figure 5 - Représentation de l'ouvrage, des stations et de l'issue de secours .....	9
Figure 6 - Répartition des accélérateurs en tunnel .....	10
Figure 7 - Courbes de montée en puissance des différents incendies possibles sur matériel roulant (sources : CETu).....	12
Figure 8 - Courbes de montée en puissance d'après la NFPA 92 .....	13
Figure 9 - Interpolation des courbes de montée en puissance du CETu .....	13
Figure 10 - Courbes de montée en puissance retenues dans l'étude .....	14
Figure 11 - Présentation des coupes et vues longitudinale du matériel roulant.....	15
Figure 12 - Récapitulatif des positions et puissances d'incendies des scénarios 1 à 4 .....	16
Figure 13 - Récapitulatif des positions et puissances d'incendies des scénarios 5 et 6 .....	16
Figure 14 - Modélisation du tunnel sous FDS .....	20
Figure 15 – Synoptique – Scénario 1 .....	21
Figure 16 – Terme source – Scénario 1 .....	21
Figure 17 - Scénario 1 - Diagramme de visibilité .....	23
Figure 18 - Scénario 1 - Diagramme de température.....	24
Figure 19 - Scénario 1 - Diagramme de rayonnement .....	24
Figure 20 - Scénario 1 - Diagramme de concentration en CO .....	25
Figure 21 – Synoptique – Scénario 2 .....	26
Figure 22 – Terme source – Scénario 2 .....	26
Figure 23 - Scénario 2 - Diagramme de visibilité .....	28
Figure 24 - Scénario 2 - Diagramme de température.....	29
Figure 25 - Scénario 2 - Diagramme de rayonnement .....	29
Figure 26 - Scénario 2 - Diagramme de concentration en CO .....	30
Figure 27 – Synoptique – Scénario 3 .....	31
Figure 28 – Terme source – Scénario 3 .....	31
Figure 29 - Scénario 3 - Diagramme de visibilité .....	33
Figure 30 - Scénario 3 - Diagramme de température.....	34
Figure 31 - Scénario 3 - Diagramme de rayonnement .....	34
Figure 32 - Scénario 3 - Diagramme de concentration en CO .....	35
Figure 33 – Synoptique – Scénario 4 .....	36
Figure 34 - Terme source - Scénario 4.....	36
Figure 35 - Scénario 4 - Diagramme de visibilité .....	38
Figure 36 - Scénario 4 - Diagramme de température.....	39
Figure 37 - Scénario 4 - Diagramme de rayonnement .....	39
Figure 38 - Scénario 4 - Diagramme de concentration en CO .....	40
Figure 39 - Synoptique - Scénario 5 .....	41
Figure 40 - Terme source - Scénario 5.....	41
Figure 41 - Scénario 5 - Diagramme de visibilité .....	43
Figure 42 - Scénario 5 - Diagramme de température.....	44

Figure 43 - Scénario 5 - Diagramme de rayonnement .....	44
Figure 44 - Scénario 5 - Diagramme de concentration en CO .....	45
Figure 45 - Synoptique - Scénario 6 .....	47
Figure 46 - Terme source - Scénario 6 .....	47
Figure 47 - Scénario 6 - Diagramme de visibilité .....	49
Figure 48 - Scénario 6 - Diagramme de température .....	50
Figure 49 - Scénario 6 - Diagramme de rayonnement .....	50
Figure 50 - Scénario 6 - Diagramme de concentration en CO .....	51



# 1 GENERALITES

## 1.1 Objet du document

Dans le cadre de la maîtrise d'œuvre et de l'instruction du dossier de sécurité du tronçon ALRON du Tramway du Luxembourg, la réalisation d'une étude d'évacuation tunnel a été confiée à INGEROP.

Un plan de situation de l'ouvrage est présenté ci-dessous :



Figure 1 - Plan de repérage du passage en tunnel à l'étude

L'objectif de l'étude d'évacuation est, notamment, de définir le niveau de sécurité apporté aux usagers en prenant en compte :

- Un incendie normé pour un tramway, dont la courbe est fournie par le CETu (1 MW) ;
- Un incendie très péjorant et peu probable d'un tramway entier en feu (10 MW) dont la courbe est reconstituée à partir des courbes d'incendie des éléments constitutifs d'un tramway considérés en feu.

## 1.2 Documents de référence

Les documents de référence sont les suivants :

- ITI n°98 300 du 08 Juillet 1998,
- SIA-197,
- Arrêté du 22 novembre 2005 relatif à la sécurité dans les tunnels des systèmes de transport public guidés urbains de personnes,
- Dossier pilote du CETU : Ventilation – Novembre 2003,
- Note d'information du CETu : Ventilation des ouvrages d'évacuation et d'accès des secours en tunnel routier – Décembre 2016.

## 2 PRESENTATION DE L'OUVRAGE

## 2.1 Géométrie

Le tunnel présente une longueur couverte de 595 m.

Il présente une largeur de 8,60 m avec une hauteur de libre de 4,80 m au niveau des cheminements d'évacuation et de 5,10 m au niveau de l'espace de circulation du Tram.

Une coupe type est présentée ci-dessous :

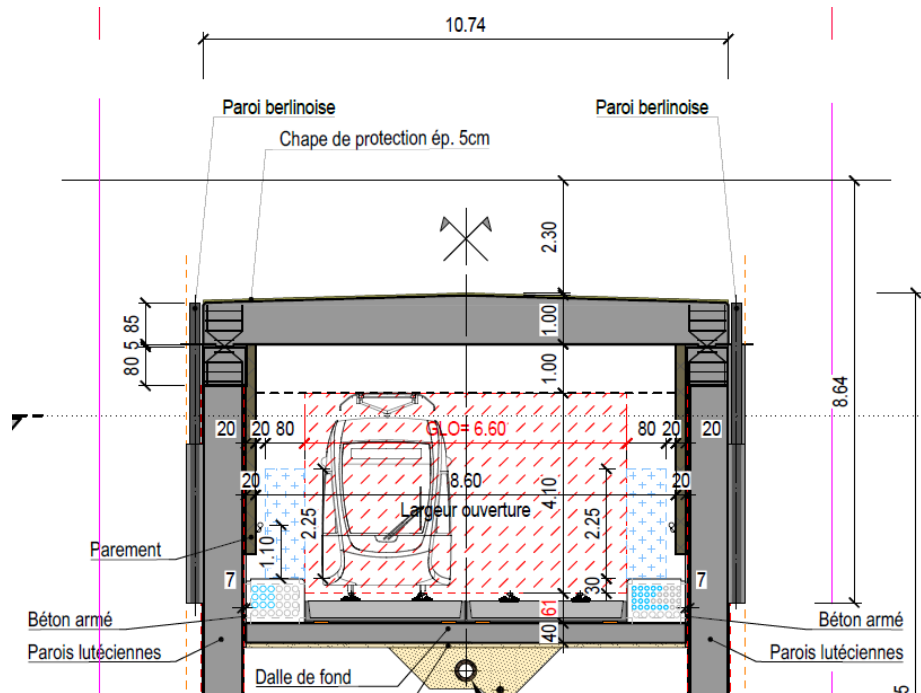


Figure 2 - Coupe type du tunnel

Le tunnel est représenté sur la vue en plan ci-dessous. L'orientation du tunnel est globalement Nord-Ouest-Ouest / Sud-Est-Est.

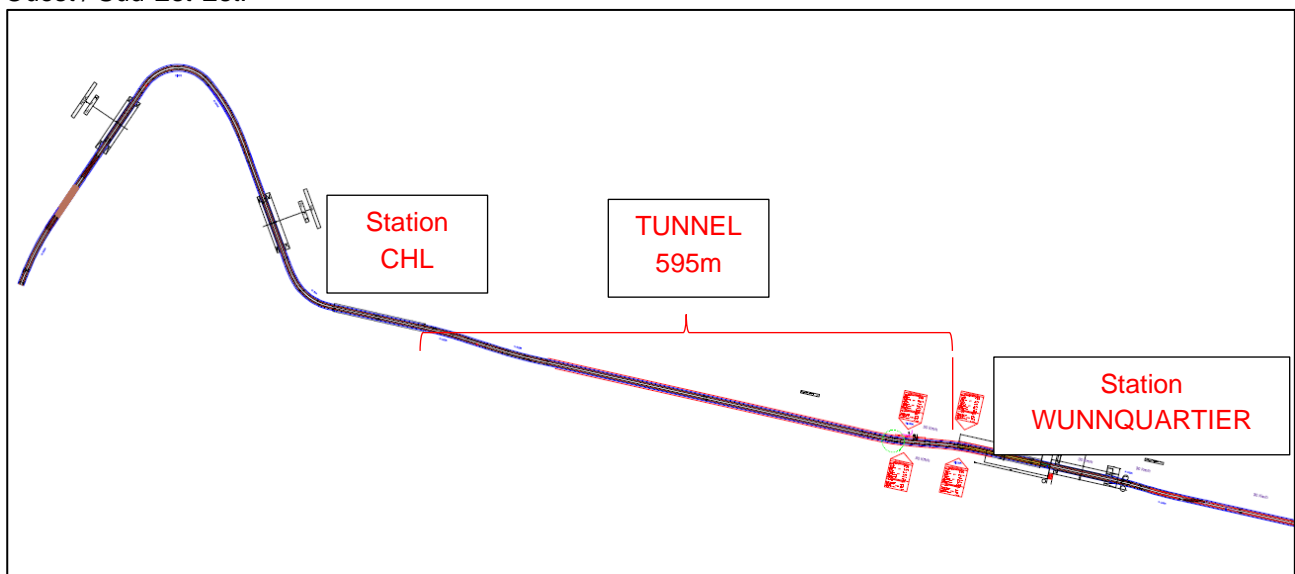


Figure 3 - Représentation de la partie tunnel



Le profil en long est présenté ci-dessous :

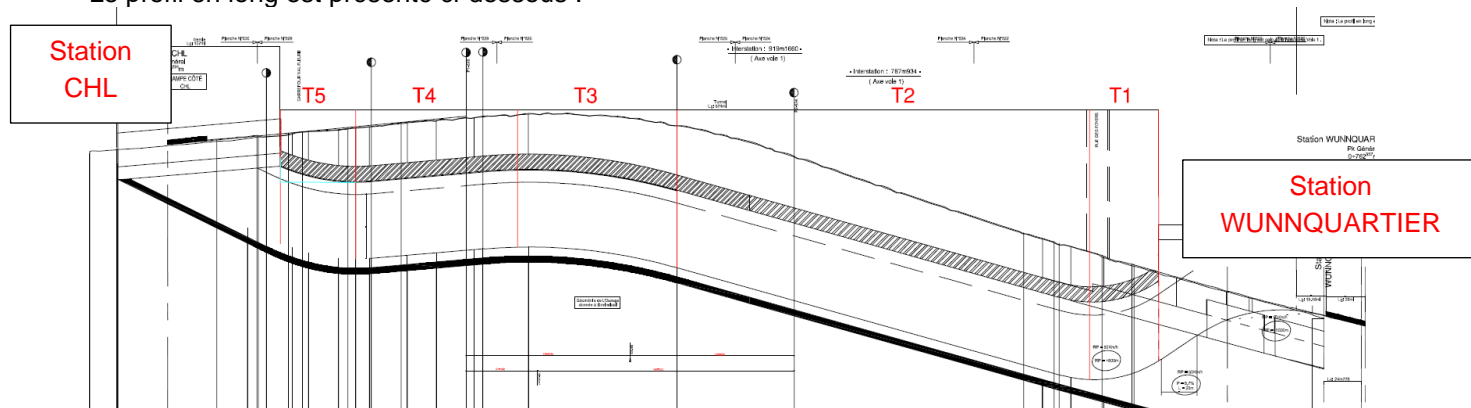


Figure 4 - Profil en long du tunnel

Les caractéristiques géométriques de chacun des tronçons d'ouvrage sont présentées ci-dessous :

Tronçon	T1	T2	T3	T4	T5
Longueur (m)	35	275	100	115	70
pente	-2.7%	2.7%	1.4%	-0.7%	2.6%
Périmètre (m)	27.4				
Section (m <sup>2</sup> )	43.9				

Nota : le sens de la pente est donné de la station WUNNQUARTIER vers la Station CHL.

## 2.2 Évacuation des usagers

Le cheminement d'évacuation des usagers est assuré par l'aménagement d'un trottoir sur chaque piédroit libérant une largeur de passage de 0,80 m sur une hauteur de 2,25 m. Le cheminement d'évacuation dispose d'une main courante.

Le dessin de l'ouvrage avec les trémies d'entrée (stations CHL et WUNNQUARTIER) et la position de l'issue de secours est présenté ci-dessous :

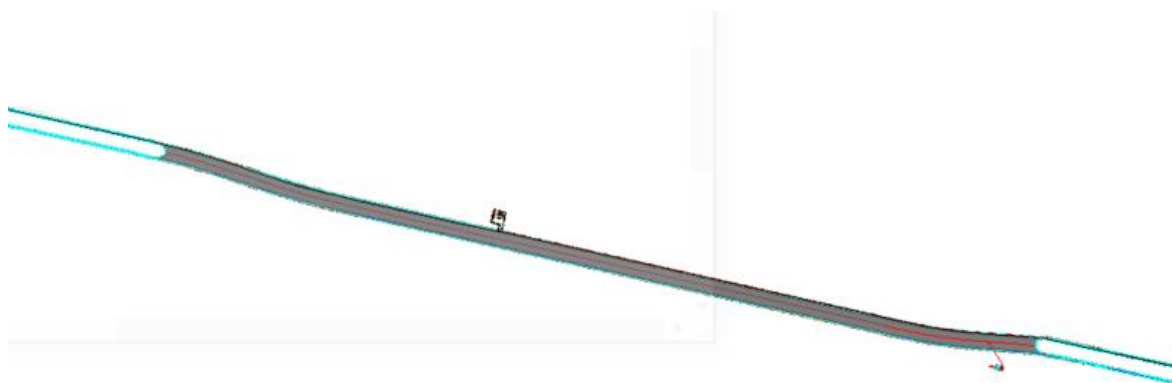


Figure 5 - Représentation de l'ouvrage, des stations et de l'issue de secours

L'issue de secours est située :

- À environ 224 m de la sortie côté Ouest (station CHL) ;
- À environ 235 m de la sortie côté Est (station WUNNQUARTIER).

## 2.3 Éclairage

L'éclairage du tunnel est conforme à l'IT et comprend :

- Un éclairage de sécurité et de cheminement (réseau sécurisé) ;
- Un éclairage de confort.

## 2.4 Système de désenfumage

Le système de ventilation/désenfumage est de type longitudinal avec la mise en œuvre d'accélérateurs.

Le système de ventilation mécanique a été dimensionné afin de permettre de repousser l'ensemble des fumées d'un incendie de référence de 10 MW avec une vitesse de courant d'air de 1,7 m/s (vitesse critique) pour des conditions atmosphériques défavorables de 30 Pa (cette contre-pression pourra être ajustée à 20 Pa en tête CHL et 10 Pa en tête WUNNQUARTIER d'après la rose des vents avec une marge de 5 Pa, pour optimiser l'installation).

Le système de ventilation de type longitudinal prévoit la mise en œuvre de 4 rampes de 3 accélérateurs, soit 12 accélérateurs au total.

Le schéma ci-dessous illustre la configuration des installations :

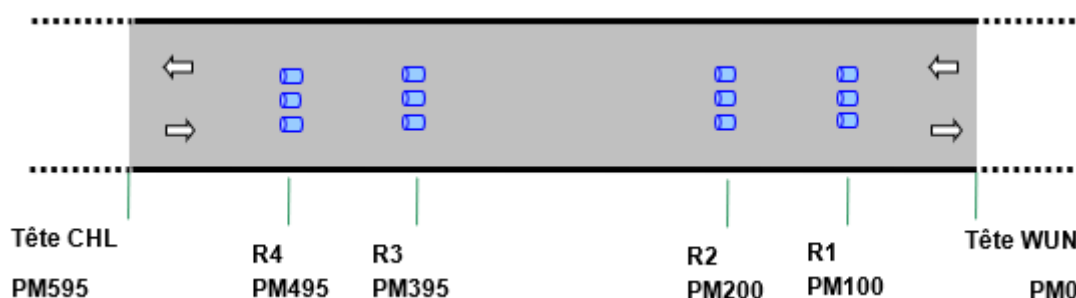


Figure 6 - Répartition des accélérateurs en tunnel

L'implantation des accélérateurs respecte les principes suivants :

- Accélérateurs localisés à au moins 100 m des têtes afin de permettre la réversibilité des installations ;
- Distances entre accélérateurs de 100 m environ afin de s'affranchir du risque de perturbation d'une batterie sur l'autre.

Les caractéristiques des accélérateurs sont proposées ci-après :

Type accélérateur	Bidirectionnel
Possibilité inversion sens rotation	>95%
Diamètre hélice (mm)	900
Diamètre hors tout (mm)	1100
Longueur hors tout silencieux 1D (mm)	3800
Rendement positionnel (%)	80
Poussée en champs libre (N)	671 (avec prise en compte des accessoires, 746 nominal)
Vitesse d'éjection (m/s)	32,1
Puissance moteur (kW)	22
Tenue au feu	200°C – 2 heures

Les accélérateurs sont installés dans des bossages prévus à cet effet.

Il est important de noter que le système de ventilation / désenfumage n'est mis en fonctionnement que lors de la phase de lutte incendie, à savoir lors de l'intervention des pompiers.

Pendant toute la phase d'évacuation des usagers, le système de ventilation de type longitudinal est à l'arrêt afin de maintenir la stratification des fumées. Le sens d'évacuation des usagers n'étant pas prévisible, il convient de ne pas repousser les fumées déstratifiées sur des usagers en dégradant leurs conditions de visibilité tout en augmentant la toxicité des fumées. La stratégie à retenir en termes de désenfumage a été présentée aux services de secours afin de garantir l'évacuation des usagers et favoriser l'intervention des services de secours pendant la phase de lutte incendie.

## 2.5 Surveillance de l'ouvrage

L'ouvrage est supervisé depuis le PCC.

### 2.5.1 Communication entre le PCC – le conducteur – les voyageurs

Le véhicule dispose de 6 liaisons phoniques :

- **Les liaisons Radio**

- La liaison conducteur / PCC : cette liaison permet au conducteur de communiquer avec le poste de contrôle du tramway et inversement ;
- L'appel de détresse : cette liaison conducteur / PCC est déclenchée de manière discrète par appui du conducteur sur une pédale. L'appel reçu au PCC est prioritaire sur les autres appels ;
- La liaison PCC / voyageurs : cette liaison permet au PCC, après activation par le conducteur, d'informer les voyageurs.

- **Les liaisons internes au tramway**

- La liaison conducteur / voyageurs : cette liaison permet au conducteur d'informer les voyageurs ;
- La liaison appel d'urgence voyageur / conducteur : en cas d'urgence, un voyageur peut appeler le conducteur en appuyant sur le bouton d'appel d'urgence situé sur le montant droit de chaque porte. Le conducteur répond par l'intermédiaire de la liaison conducteur / voyageurs ;
- La liaison cabine / cabine : cette liaison est utilisée lors d'intervention nécessitant deux conducteurs afin de communiquer entre les deux cabines d'extrémités du tramway ou lorsque deux tramways sont attelés.

### 2.5.2 Communication entre le PCC et les autorités

Les principes de coordination et de communication entre l'exploitant et les autorités seront précisés ultérieurement et suivront les directives inscrites dans le PIS.

## 2.6 Accès et moyens de secours

### 2.6.1 Localisation et caractéristiques des accès de secours

Les services de secours pourront accéder à l'ouvrage souterrain par l'intermédiaire des deux têtes situées à l'Est et à l'Ouest de l'ouvrage (station CHL et station WUNNQUARTIER), mais également par l'intermédiaire de l'issue de secours située en partie centrale de l'ouvrage.

À ce stade, il n'est pas prévu de voie dédiée pour les services de secours. Une place de stationnement d'une longueur de 10 m devra être aménagée aux têtes afin de permettre le garage d'un véhicule de secours.

### 2.6.2 Équipements d'alimentation en eau pour l'incendie

Une réserve d'eau spécifique à la lutte contre l'incendie est prévue afin de permettre de fournir 800 l/min pendant 120 min, soit un volume de 96 m<sup>3</sup>. Une conduite d'eau est prévue avec 5 remontées de poteau incendie.

### 3 DÉFINITION DES SCÉNARIOS INCENDIE

#### 3.1 Synthèse du système de ventilation

Aucun accélérateur n'est en fonctionnement pendant la phase d'évacuation du tunnel. Les accélérateurs n'ont que vocation à désenfumer le tunnel au moment de l'intervention des services de secours, après la phase d'évacuation.

#### 3.2 Conditions aérauliques

##### 3.2.1 Conditions aux limites

Selon les scénarios, les conditions aux limites (CL) évoluent de sorte à considérer les conditions péjorantes pour chaque scénario. Les conditions aux limites dépendent de la position de l'incendie et sont définies comme suit :

- Incendie entre l'issue de secours et la tête Ouest (station CHL) :
  - Tête Ouest (station CHL) : conditions aux limites de type PRESSION (15 Pa) au niveau de la sortie du tunnel ;
  - Tête Est (station WUNNQUARTIER) : OPEN (conditions libres).
- Incendie entre l'issue de secours et la tête Est (station WUNNQUARTIER) :
  - Tête Ouest (station CHL) : OPEN (conditions libres) ;
  - Tête Est (station WUNNQUARTIER) : conditions aux limites de type PRESSION (5 Pa) au niveau de la sortie du tunnel.

##### 3.2.2 Conditions initiales

Il n'y a pas de ventilation sanitaire en fonctionnement, l'effet de pistonnement n'est pas pris en compte.

#### 3.3 Termes sources

Deux types d'incendie sont retenus :

- L'incendie de référence se base sur la note d'information « Étude des feux de référence en tunnel de transports guidés urbains, synthèse » (CETu, avril 2019), en retenant le feu d'intercirculation (1 MW, courbe rouge ci-dessous) ;

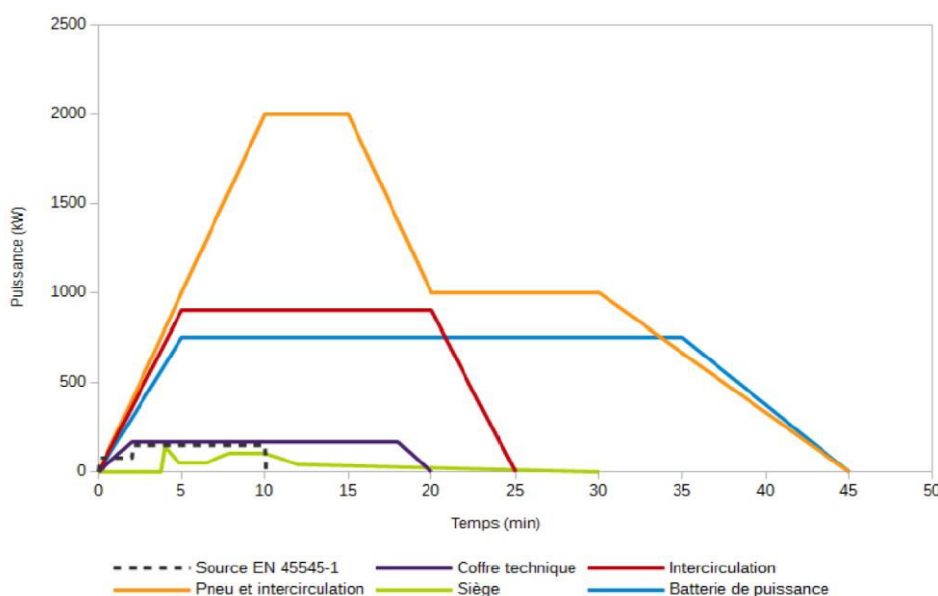


Figure 7 - Courbes de montée en puissance des différents incendies possibles sur matériel roulant (sources : CETu)

- Un incendie péjorant (très peu probable) de 10 MW est étudié, dans le cas d'un incendie du tramway entier, en simultané. La courbe de montée en puissance d'un tel incendie est déterminée à partir des données de cinétiques des feux de la NFPA 92, combiné aux données du CETu (cf. référence ci-dessus)

#### Détermination de la courbe de puissance 10 MW :

La NFPA 92 fournit les données de montées en puissance, tracées ci-dessous pour une puissance de 10 MW :

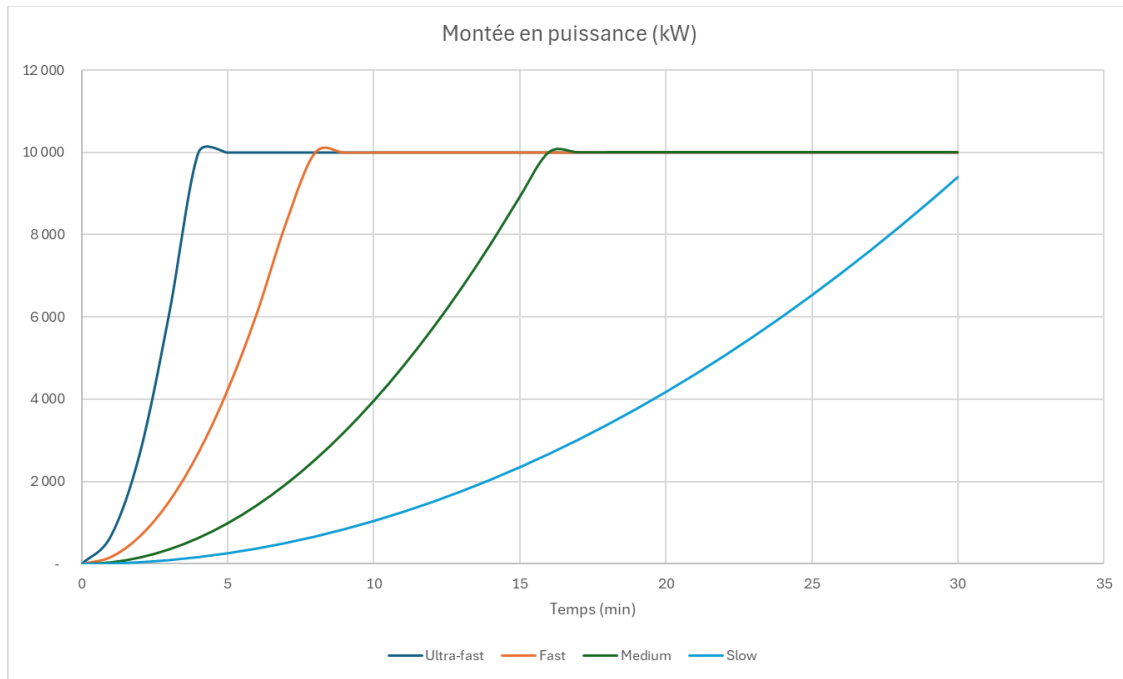


Figure 8 - Courbes de montée en puissance d'après la NFPA 92

Pour déterminer la cinétique de montée en puissance (ultra rapide, rapide, moyenne ou lente), une courbe d'interpolation des données du CETu a été réalisée, en supposant un déclenchement successif de tous les éléments pouvant prendre feu, d'après les courbes présentées au premier point :

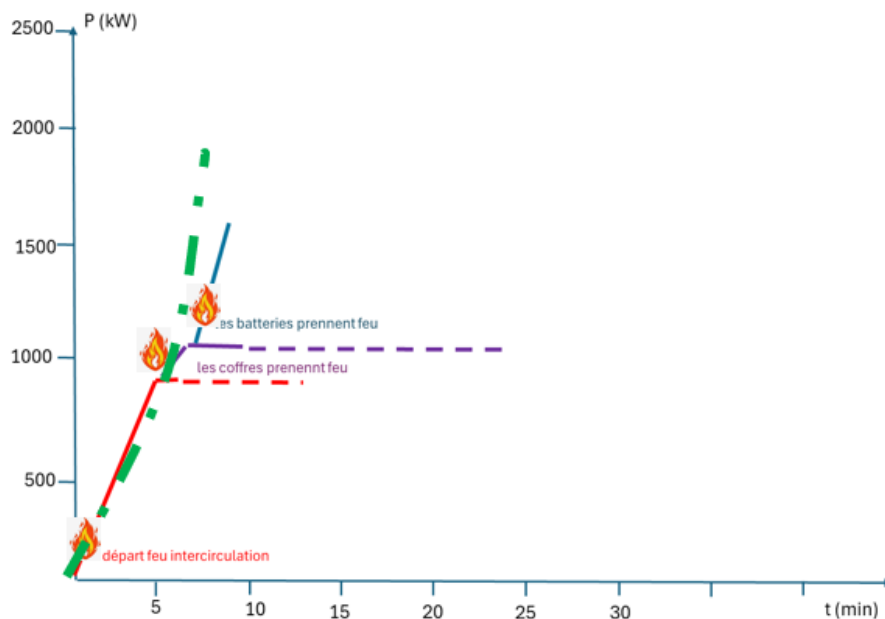


Figure 9 - Interpolation des courbes de montée en puissance du CETu



Cette courbe permet de déterminer que l'incendie atteindrait 1 MW en approximativement 5 min. La courbe, selon la NFPA 92, correspondant à cette cinétique serait la courbe de montée en puissance moyenne (courbe verte sur la Figure 8).

Les courbes de montée en puissance retenues pour les simulations sont donc les suivantes :

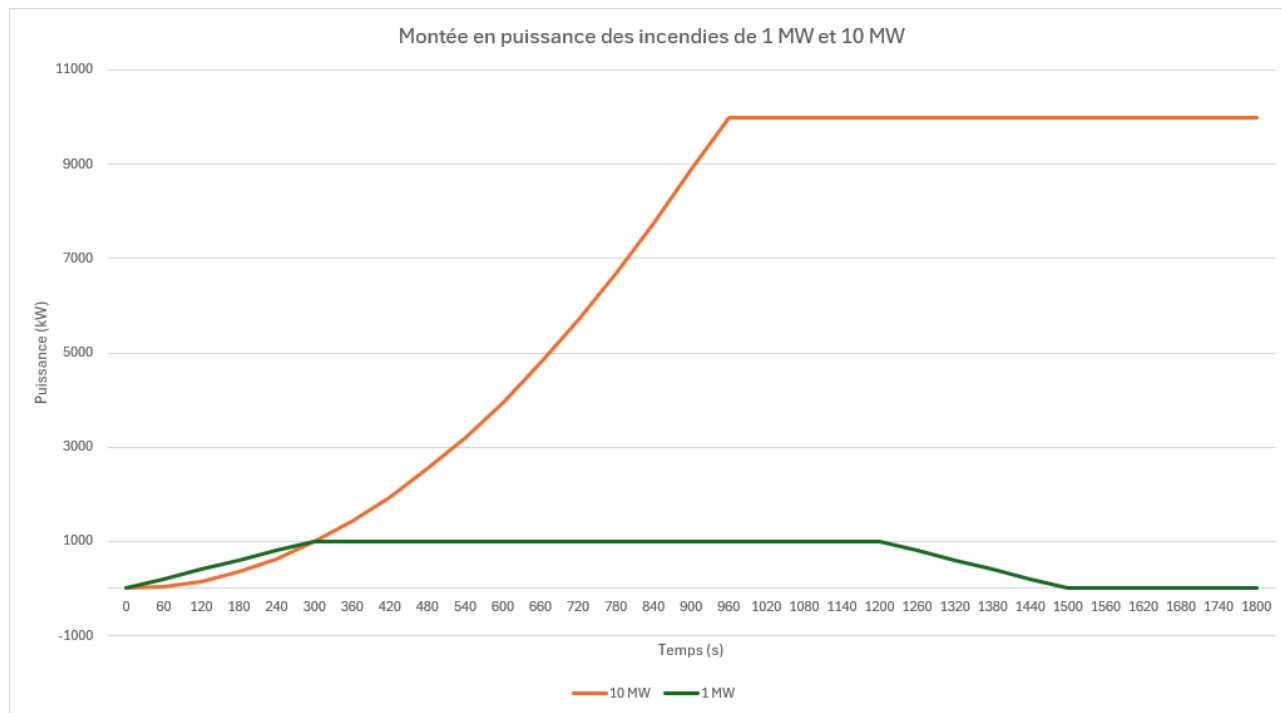


Figure 10 - Courbes de montée en puissance retenues dans l'étude

La surface sur laquelle est appliquée l'incendie de 1 MW est de 1 m de largeur sur le pourtour de l'intercirculation (3,5 m + 3,5 m + 2,5 m), le HRRPUA maximal est de 105,25 kW/m<sup>2</sup>.

La surface sur laquelle est appliquée l'incendie de 10 MW est de 56 m équivalent à la longueur du tramway sur tout le pourtour du tramway (3,5 m + 3,5 m + 2,5 m), le HRRPUA maximal est de 18,19 kW/m<sup>2</sup>.

L'incendie, selon le scénario, se déclare en tête ou en milieu de tramway pour l'incendie de 1 MW, et sur tout le matériel roulant pour l'incendie de 10 MW.

### 3.4 Hypothèses de mise en sécurité

Il est considéré la séquence de mise en sécurité suivante :

- Début d'incendie : T0
- Alerte du conducteur de la rame par les usagers : T0 + 1'
- Levée de doute et remontée d'alarme vers le PCC : T0 + 2'
- Consignes données aux usagers, ouverture des portes : T0 + 2'30"

### 3.5 Hypothèses relatives à l'évacuation des usagers

Les hypothèses retenues sont les suivantes :

- Taux d'occupations des rames : 100% (soit 345 personnes)
- Sortie du premier usager de la rame : T0 + 2'30"
- Débit d'évacuation le long de la banquette : 50 voyageurs/min
- Sortie du dernier usager si incendie en tête de rame et portes ouvertes d'un seul côté : T0 + 9'30"
- Sortie du dernier usager si incendie en tête de rame et portes ouvertes des deux côtés : T0 + 6'
- Sortie du dernier usager si incendie en milieu de rame et portes ouvertes d'un seul côté : T0 + 6'
- Sortie du dernier usager si incendie en milieu de rame et portes ouvertes des deux côtés : T0 + 4'15"

*Nota : Les règles de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les gares définissent dans l'article GA23 les débits d'évacuation des usagers selon la nature du cheminement. Le débit d'évacuation le long de la banquette de 50 voyageurs / minute est estimé en prenant en compte le débit correspondant à un dégagement de type couloir (100 voyageurs / minute / mètre de largeur) minoré de 50% afin de tenir compte des conditions spécifique en lien avec l'aménagement de la banquette et l'environnement tunnel.*

### 3.6 Autres grandeurs

Le matériel roulant est composé de 9 modules. La rame a une longueur de 55,911 m, elle présente une largeur de 2,650 m et une hauteur de 3,6 m.

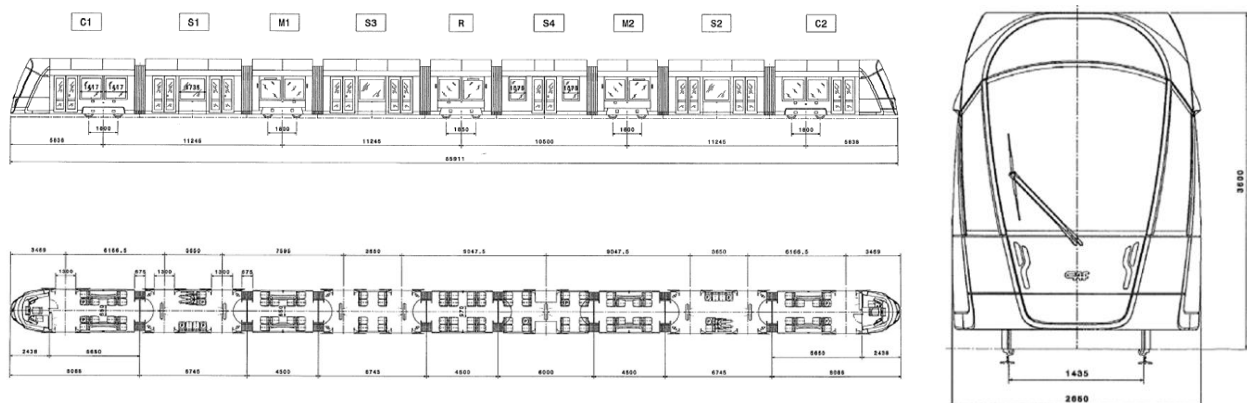


Figure 11 - Présentation des coupes et vues longitudinale du matériel roulant

### 3.7 Scénarios proposés

Conformément aux objectifs fixés par l'étude, 6 scénarios incendie seront étudiés :

- Scénario 1 : Incendie de 1 MW en tête de rame pour un tramway arrêté entre la station CHL et l'issue de secours ;
- Scénario 2 : Incendie de 1 MW en milieu de rame pour un tramway arrêté entre la station CHL et l'issue de secours ;
- Scénario 3 : Incendie de 1 MW en milieu de rame pour un tramway arrêté entre l'issue de secours et la station WUNNQUARTIER ;
- Scénario 4 : Incendie de 1 MW en tête de rame pour un tramway arrêté entre l'issue de secours et la station WUNNQUARTIER ;
- Scénario 5 : Incendie de 10 MW sur toute la rame pour un tramway arrêté entre la station CHL et l'issue de secours ;
- Scénario 6 : Incendie de 10 MW sur toute la rame pour un tramway arrêté entre l'issue de secours et la station WUNNQUARTIER.

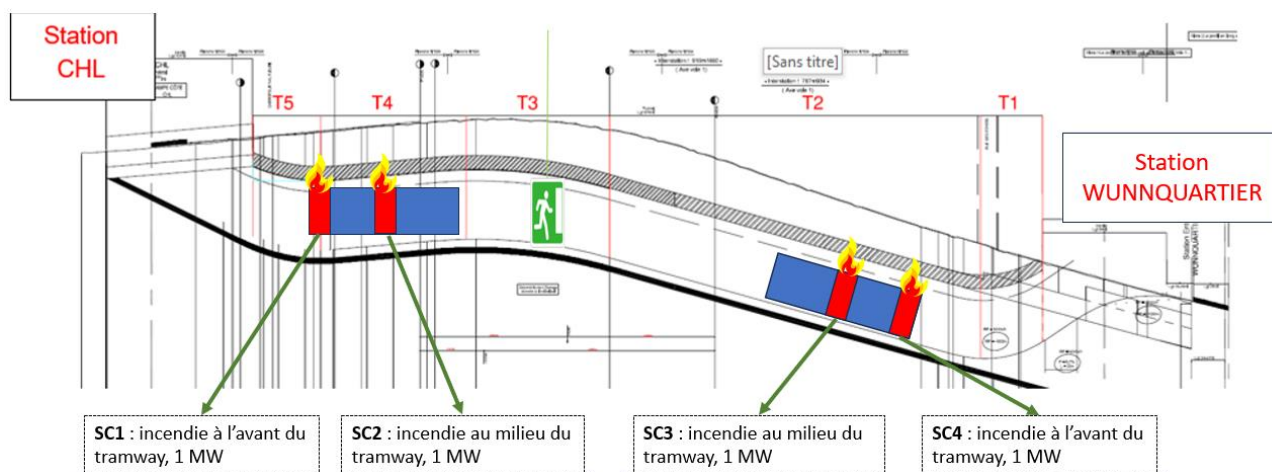


Figure 12 - Récapitulatif des positions et puissances d'incendies des scénarios 1 à 4

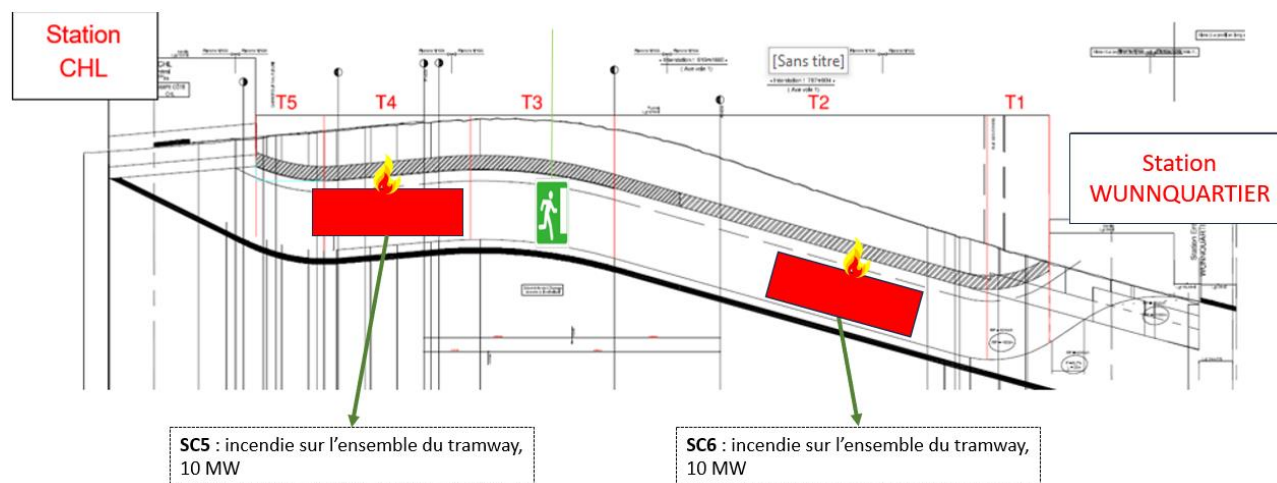


Figure 13 - Récapitulatif des positions et puissances d'incendies des scénarios 5 et 6

Le tableau ci-dessous récapitule les hypothèses retenues pour chaque scénario :

Scénario	Type	Localisation	$\Delta P$	Modèle de simulation
1	Incendie d'intercirculation 1 MW	Tête de rame, entre CHL et IS	15 Pa tête CHL	3D
2	Incendie d'intercirculation 1 MW	Milieu de rame, entre CHL et IS	15 Pa tête CHL	3D
3	Incendie d'intercirculation 1 MW	Milieu de rame, entre IS et WUN	5 Pa tête WUNNQUARTIER	3D
4	Incendie d'intercirculation 1 MW	Tête de rame, entre IS et WUN	5 Pa tête WUNNQUARTIER	3D
5	Incendie de rame complète 10 MW	Toute la rame, entre CHL et IS	15 Pa tête CHL	3D
6	Incendie de rame complète 10 MW	Toute la rame, entre IS et WUN	5 Pa tête WUNNQUARTIER	3D

### 3.8 Critères de performance pour estimer les conditions de tenabilité

Les zones de dangers engendrées par la propagation des fumées lors d'un incendie en tunnel sont délimitées par les paramètres suivants :

- État des fumées : stratification ou non ;
- Niveau d'opacité ;
- Niveau de toxicité ;
- Température des fumées ;
- Puissance calorifique transmise par rayonnement thermique.

L'impact de ces paramètres sur l'organisme des usagers permet d'établir les conditions d'évacuation, d'évaluer les vitesses d'évacuation des usagers et de déterminer le temps d'exposition des usagers aux paramètres ci-dessus.

#### **Opacité et visibilité**

La valeur de l'opacité dans le tunnel permet d'estimer les distances de visibilité, d'évaluer les vitesses d'évacuation  $V$  des usagers et de déterminer le temps d'exposition des usagers aux différentes zones de dangers.

La formule ci-dessous permet d'estimer cette distance  $d$ , en mètres, en fonction de la valeur de l'opacité  $k$ , donnée en  $m^{-1}$  et d'un coefficient d'éclairement  $C$  :

$$d = \frac{C}{k}$$

C est un coefficient compris entre 2 et 6, dans la mesure où les issues sont équipées de feux flash ainsi que de dispositifs dynamiques de guidage de type chevrons, ce qui est considéré comme étant le cas dans le tunnel étudié ici. C est calculé en fonction de l'interdistance L entre les issues de cette manière :

- $C=6$  si  $L \leq 100$  ;
- $C=5$  si  $L \leq 200$  ;
- $C=4$  si  $L \leq 400$
- $C=3$  si  $L \leq 400$  et que les issues ne sont pas équipées de dispositifs dynamiques de guidage de type chevrons
- $C=2$  pour un tunnel sans issue de secours.

Dans cet ouvrage,  $L = 235$  m, donc  $C = 4,825$ .

Le tableau ci-dessous présente les vitesses d'évacuation retenues pour les usagers, en fonction de l'opacité ou de la visibilité équivalente.

La note d'information « Étude des feux de référence en tunnel de transports guidés urbains, synthèse » (CETu, avril 2019) définit les critères ci-dessous :

Vitesse (m/s)	1	0,5	0,3
Opacité ( $m^{-1}$ )	$k \leq 0,24$	$0,24 \leq k < 1,03$	$1,03 < k$
Distance (m)	$20 \leq d$	$5 \leq d < 20$	$d < 5$

### **Seuil de capacité de déplacement et de mortalité**

Les pertes de capacité d'auto-évacuation sont les suivantes :

Température

- À  $80^{\circ}\text{C}$ , pendant 15 min ;
- À  $120^{\circ}\text{C}$ , instantanément.

Flux radiatif

- Autour de  $2 \text{ kW/m}^2$ , pendant 2 min ;
- Plus de  $5 \text{ kW/m}^2$ , instantanément.

Taux de CO

- À 3000 ppm, pendant 12 min ;
- À 5000 ppm, pendant 7 min ;
- À 7000 ppm, instantanément.



### 3.9 Outils utilisés

#### Logiciel 1D : CAMATT V2.20

Pour déterminer les conditions aux limites du modèle 3D, les simulations à froid (sans incendie) seront effectuées avec le logiciel CAMATT, développé par le Centre d'Étude des Tunnel (CETu). Ce logiciel décrit les effets aérodynamiques et thermiques sur une section de tunnel modélisée en une dimension en régime transitoire. Il prend en compte les caractéristiques des équipements (ventilateurs, accélérateurs, extraction massive...), les conditions d'environnement (contre-pressions aux têtes) et les échanges de chaleur entre les parois et les fumées, ainsi que l'échauffement des parois. Il permet de connaître en tous points du réseau et pour chaque pas de temps, la pression, la vitesse, la température de l'air et la concentration en polluants.

#### Logiciel 3D : FDS

FDS (Fire Dynamic Simulation) est développé par le National Institute of Standards and Technology (NIST). Ce logiciel est un modèle de mécanique des fluides (CFD) appliqué au transport de flux dans les régimes de combustion. Ce logiciel permet la résolution des équations de Navier-Stokes adaptées aux faibles vitesses de fluides, couplé à un modèle de génération de chaleur et de fumées par le feu (modèle de pyrolyse et de combustion). Il permet de prédire la production et le déplacement des fumées en prenant en compte les effets aérodynamiques réels (ventilation...).

Le modèle de turbulence utilisé est du type LES (Large Eddy Simulation). Cette méthode consiste en une simulation des grandes structures turbulentes associées à une modélisation des petits phénomènes turbulents.

FDS calcule la température, la densité, la pression, les vitesses, la combustion chimique dans chacune des cellules du domaine maillé et à chaque « pas de temps ». Il calcule aussi, au niveau des surfaces solides, la température, le flux de chaleur, le taux de perte massique et diverses autres grandeurs.

#### PYROSIM

PyroSim est l'interface graphique utilisateur pour FDS. Elle permet de construire des géométries complexes grâce à un outil de dessin ou en important des plans (Autocad). FDS et le programme de visualisation Smokeview y sont tous deux intégrés. L'interface PyroSim fournit les informations d'entrée et assure le format correct pour le fichier d'entrée de FDS.

### 3.10 Modélisation de l'ouvrage

La géométrie réalisée est conforme aux caractéristiques géométriques relevées sur plans.

En particulier, sont pris en compte :

- Les éléments de forte dimensions ;
- La déclivité de l'ouvrage.

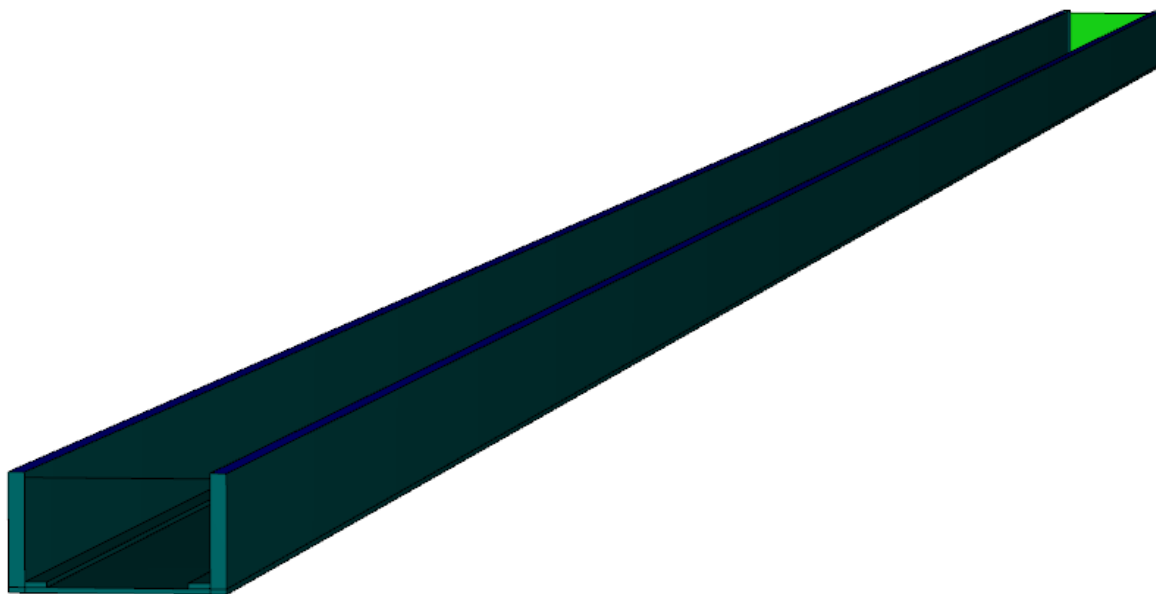


Figure 14 - Modélisation du tunnel sous FDS

**Le périmètre du modèle comprend uniquement la partie tunnel.** Les stations ne sont pas modélisées.

Le tunnel est modélisé en alignement droit, les courbures de ce dernier n'impactant pas de manière significative le développement des fumées.

La durée des simulation est de 20 min afin d'évaluer les conditions d'ambiance régnant dans l'ouvrage lors de la phase d'évacuation des usagers et de la phase d'intervention des services de secours.

Le domaine de calcul est défini par un maillage cartésien, composé de mailles cubiques de dimension 25 cm x 25 cm x 25 cm avec un total de 2 094 400 mailles.

## 4 ANALYSE DES RÉSULTATS DES SIMULATIONS NUMÉRIQUES

### 4.1 Scénario 1 : incendie de 1 MW en début de rame, entre la station CHL et l'issue de secours

#### 4.1.1 Présentation du scénario

L'objectif de ce scénario incendie est d'analyser les conditions d'évacuation des usagers lors d'un incendie en tête de rame dans le tunnel.

La puissance de l'incendie est de 1 MW (feu d'intercirculation) pour une rame arrêtée dans le tunnel entre la station CHL et l'issue de secours.

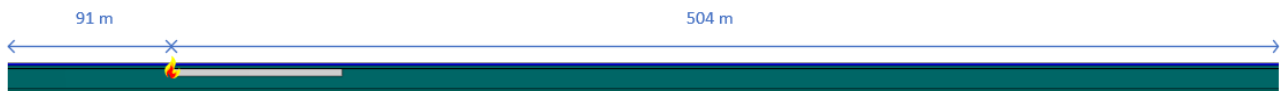


Figure 15 – Synoptique – Scénario 1

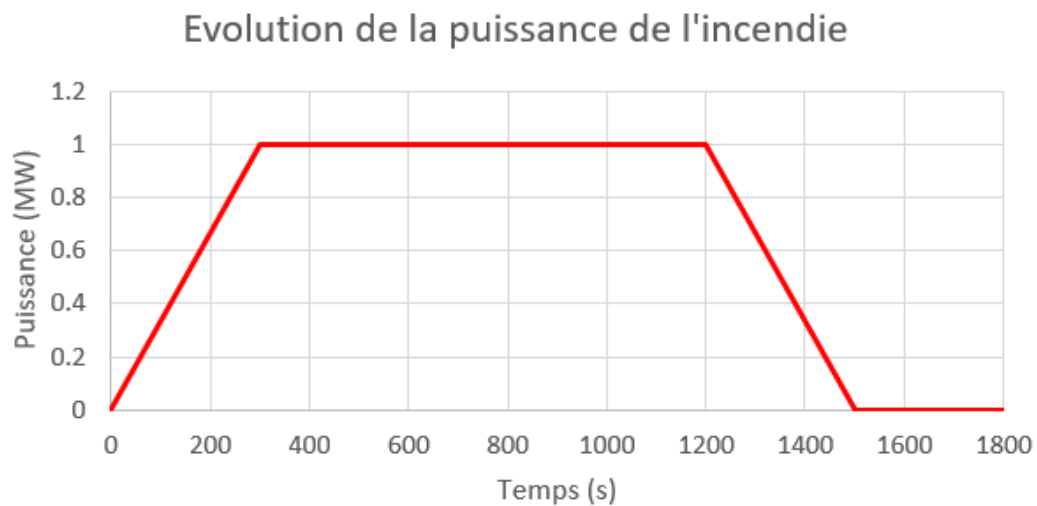


Figure 16 – Terme source – Scénario 1

## 4.1.2 Déroulement du scénario

Temps	Situation	Lieu	Conséquences	Dispositions équipements	Dispositions d'exploitation
T0	<b>Incendie</b> en tête de Tramway	PM 504	Arrêt du trafic		
T0 + 1'	<b>Alerte</b> du conducteur de la rame par les usagers	PM 504	Le conducteur prend conscience de l'incident (présence de fumées, suspicion de blessés)		
T0+ 2'	Levée de doute et remontée d'alarme vers le PC de sécurité	PC			
T0 + 2'30"	Consignes données aux usagers	PM 504			L'opérateur alerte les services de secours
	Sortie du premier usager de la rame	PM 504			
T0 + 5'	L'incendie atteint sa puissance maximale	PM 504			
T0 + 8'30" OU T0 + 12'	Fin d'évacuation du dernier usager	Issue de secours	Tous les usagers sont hors de danger		
T0 + 20'	Arrivée des services de secours		Début reconnaissance dans l'ouvrage Recherche des témoins	Prises pompiers, niches incendie	Les services de secours prennent le contrôle des opérations
T0 + xx'	Fin de l'incident	Tunnel	Nettoyage de l'ouvrage, évaluation des dégâts		Evaluation des conditions de réouverture

#### 4.1.3 Analyse des conditions d'évacuation

L'évacuation des usagers pendant un incendie dépend de la visibilité et des paramètres définissant les zones de dangers. Les figures qui suivent présentent les conditions ambiantes en fonction du temps et de la position dans l'ouvrage. Ils doivent être analysés pour déterminer les temps d'évacuation des usagers ainsi que les conditions rencontrées durant cette phase.

La lecture du diagramme se fait comme suit :

- Le cheminement des usagers est représenté par les segments bleus ;
- Un segment vertical signifie que l'usager ne se déplace plus et représente son immobilisation. Un rond noir marque le décès potentiel de l'usager ;
- L'usager est considéré hors de danger lorsqu'il atteint les issues de secours ou les extrémités du tunnel.

Les diagrammes proposés sont construits à partir des résultats de la modélisation 3D sous FDS, qui sont présentés en détail en annexe. Les valeurs prises en compte sont celles à hauteur d'Homme, soit à une hauteur de 2 m.

Les figures suivantes présentent les différentes conditions d'évacuation à hauteur d'Homme dans le tunnel à partir du démarrage de l'incendie jusqu'à l'intervention des services de secours.

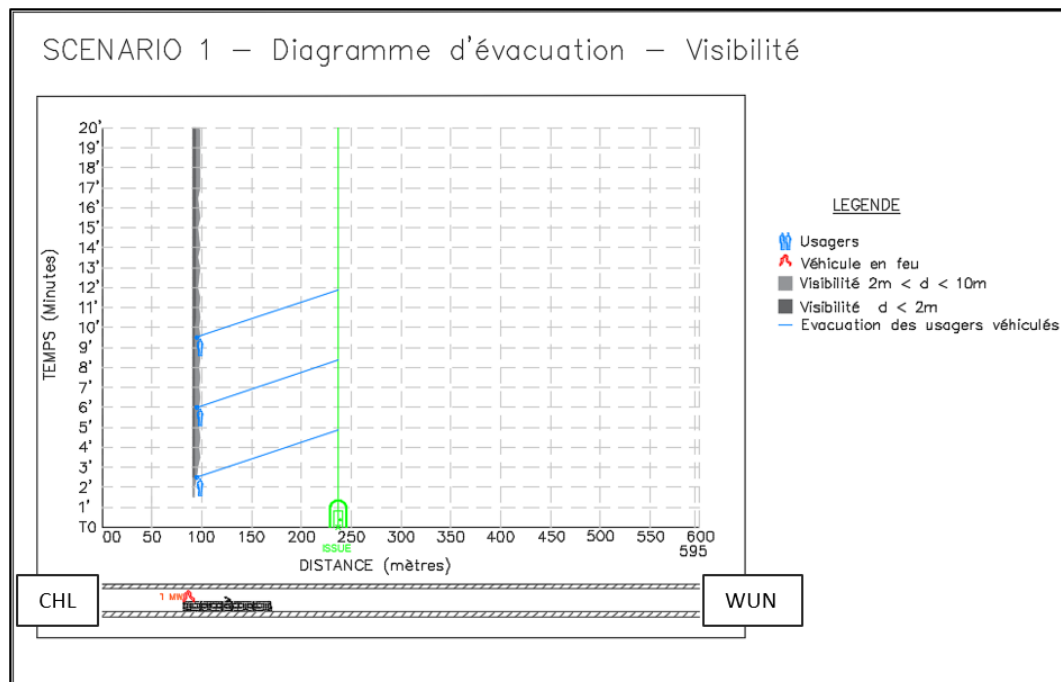


Figure 17 - Scénario 1 - Diagramme de visibilité



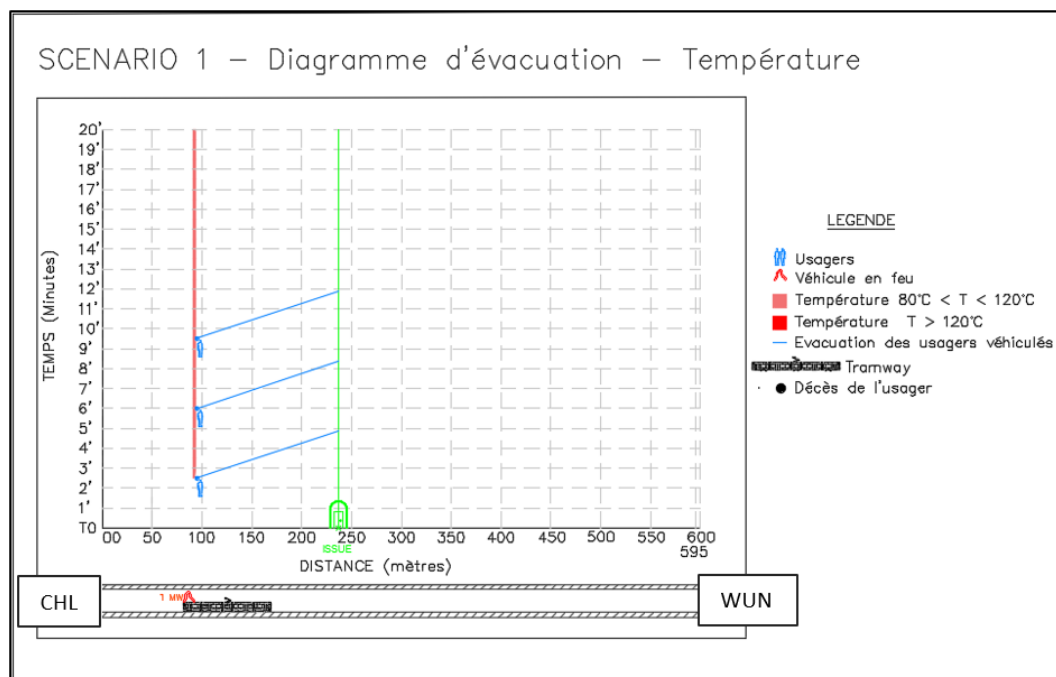


Figure 18 - Scénario 1 - Diagramme de température

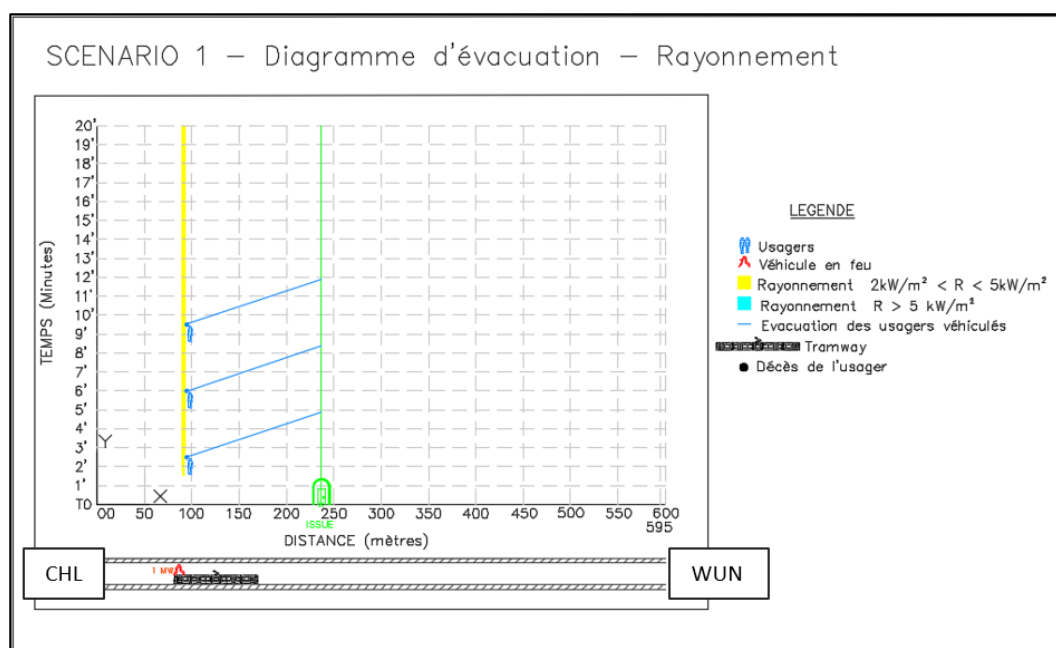


Figure 19 - Scénario 1 - Diagramme de rayonnement

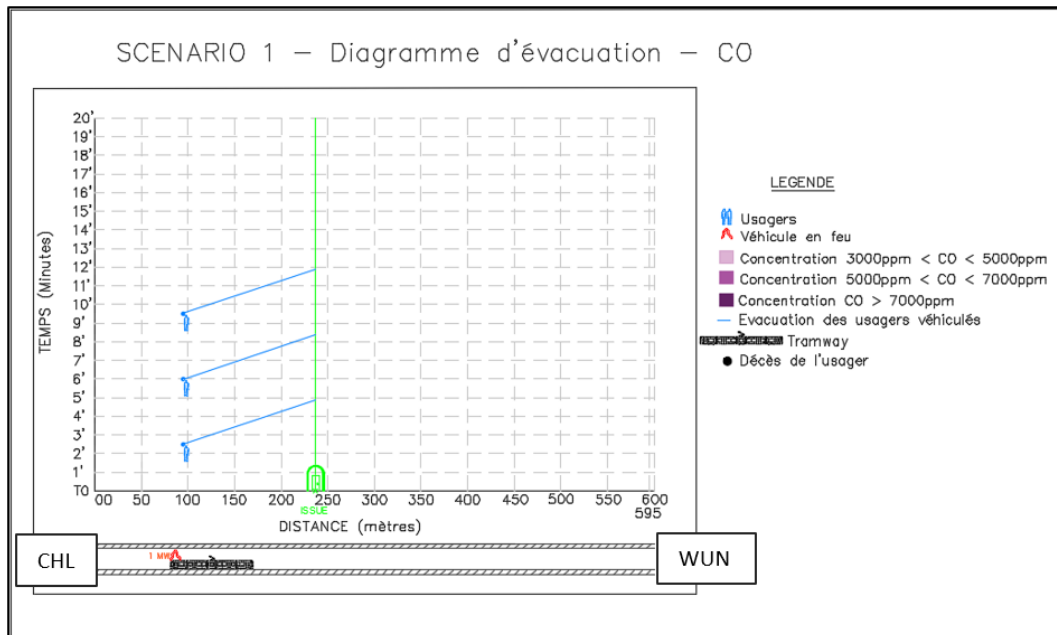


Figure 20 - Scénario 1 - Diagramme de concentration en CO

### Évolution de l'incendie et comportement des fumées

- Avant le début de l'incendie et due à la contrepression en tête CHL, la vitesse du courant d'air initiale dans la section de l'ouvrage est de l'ordre de 2,51 m/s dans le sens CHL vers WUN ;
- Dans les premières minutes d'incendie, les fumées se propagent majoritairement en partie haute, au-dessus du matériel roulant, de manière stratifiée (absence de fumée à hauteur d'Homme), vers la station WUN, sur le linéaire du tramway (environ une 50aine de mètres) ;
- À  $t_0 + 5$  min, l'incendie a atteint sa puissance maximale ;
- Les fumées restent stratifiées sur environ 90 mètres vers la station WUN (aucune fumée à hauteur d'Homme) tout au long de la simulation ;
- En dehors de la zone située à proximité immédiate de l'incendie, le niveau de température à hauteur d'Homme reste inférieur à 50°C sur l'ensemble de l'ouvrage ;
- La concentration en monoxyde de carbone dans tout le tunnel reste inférieure à 1200 ppm.

### Évacuation des usagers du tramway via la station CHL

- Aucun usager n'évacue par la station CHL pour ne pas passer devant l'incendie en évacuant.

### Évacuation des usagers du tramway via l'issue de secours

- Les premiers usagers sortent du tramway 2 min 30 s après le début de l'incendie ;
- La distance à parcourir pour rejoindre l'issue de secours est d'environ 146 m ;
- La bonne stratification des fumées entre la rame et l'issue leur permet de cheminer dans de bonnes conditions de visibilité, tout au long de l'évacuation ;
- Les premiers usagers atteignent l'issue à partir de 4 min 50 s après le début de l'incendie ;
- Les derniers usagers atteignent l'issue entre 8 min 21 s et 11 min 51 s, selon que les portes sont, respectivement, ouvertes des deux côtés ou d'un seul côté ;
- Nombre d'usagers évacués : 345 personnes.

### Conditions d'intervention des services de secours

- En fonction des conditions de circulation, il est pris en considération que les secours arrivent 20 min après le début de l'incendie aux stations CHL et WUN, et au niveau de l'issue de secours ;
- Les services de secours peuvent intervenir sans difficulté depuis les stations et l'issue de secours compte tenu des bonnes conditions d'ambiance entre l'issue de secours et l'incendie.

## 4.2 Scénario 2 : incendie de 1 MW en milieu de rame, entre la station CHL et l'issue de secours

### 4.2.1 Présentation du scénario

L'objectif de ce scénario incendie est d'analyser les conditions d'évacuation des usagers lors d'un incendie en milieu de rame dans le tunnel.

La puissance de l'incendie est de 1 MW (feu d'intercirculation) pour une rame arrêtée dans le tunnel entre la station CHL et l'issue de secours.

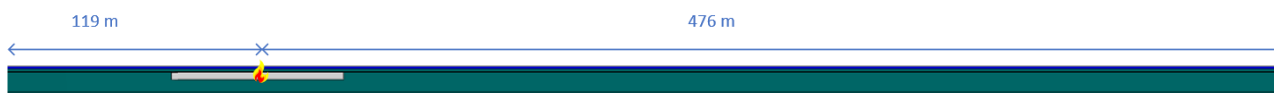


Figure 21 – Synoptique – Scénario 2

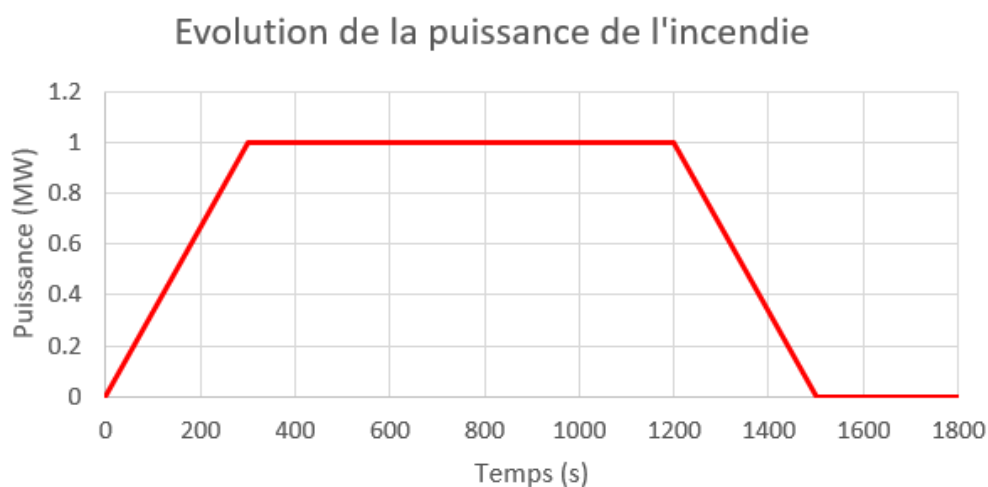


Figure 22 – Terme source – Scénario 2

## 4.2.2 Déroulement du scénario

Temps	Situation	Lieu	Conséquences	Dispositions équipements	Dispositions d'exploitation
T0	<b>Incendie</b> en milieu de Tramway	PM 476	Arrêt du trafic		
T0 + 1'	<b>Alerte</b> du conducteur de la rame par les usagers	PM 476	Le conducteur prend conscience de l'incident (présence de fumées, suspicion de blessés)		
T0+ 2'	Levée de doute et remontée d'alarme vers le PC de sécurité	PC			
T0 + 2'30"	Consignes données aux usagers	PM 476			L'opérateur alerte les services de secours
	Sortie du premier usager de la rame	PM 476			
T0 + 5'	L'incendie atteint sa puissance maximale	PM 476			
T0 + 6'30" OU T0 + 8'30"	Fin d'évacuation du dernier usager	Issue de secours	Tous les usagers sont hors de danger		
T0 + 20'	Arrivée des services de secours		Début reconnaissance dans l'ouvrage Recherche des témoins	Prises pompiers, niches incendie	Les services de secours prennent le contrôle des opérations
T0 + xx'	Fin de l'incident	Tunnel	Nettoyage de l'ouvrage, évaluation des dégâts		Evaluation des conditions de réouverture

#### 4.2.3 Analyse des conditions d'évacuation

L'évacuation des usagers pendant un incendie dépend de la visibilité et des paramètres définissant les zones de dangers. Les figures qui suivent présentent les conditions ambiantes en fonction du temps et de la position dans l'ouvrage. Ils doivent être analysés pour déterminer les temps d'évacuation des usagers ainsi que les conditions rencontrées durant cette phase.

La lecture du diagramme se fait comme suit :

- Le cheminement des usagers est représenté par les segments bleus ;
- Un segment vertical signifie que l'usager ne se déplace plus et représente son immobilisation. Un rond noir marque le décès potentiel de l'usager ;
- L'usager est considéré hors de danger lorsqu'il atteint les issues de secours ou les extrémités du tunnel.

Les diagrammes proposés sont construits à partir des résultats de la modélisation 3D sous FDS, qui sont présentés en détail en annexe. Les valeurs prises en compte sont celles à hauteur d'Homme, soit à une hauteur de 2 m.

Les figures suivantes présentent les différentes conditions d'évacuation à hauteur d'Homme dans le tunnel à partir du démarrage de l'incendie jusqu'à l'intervention des services de secours.

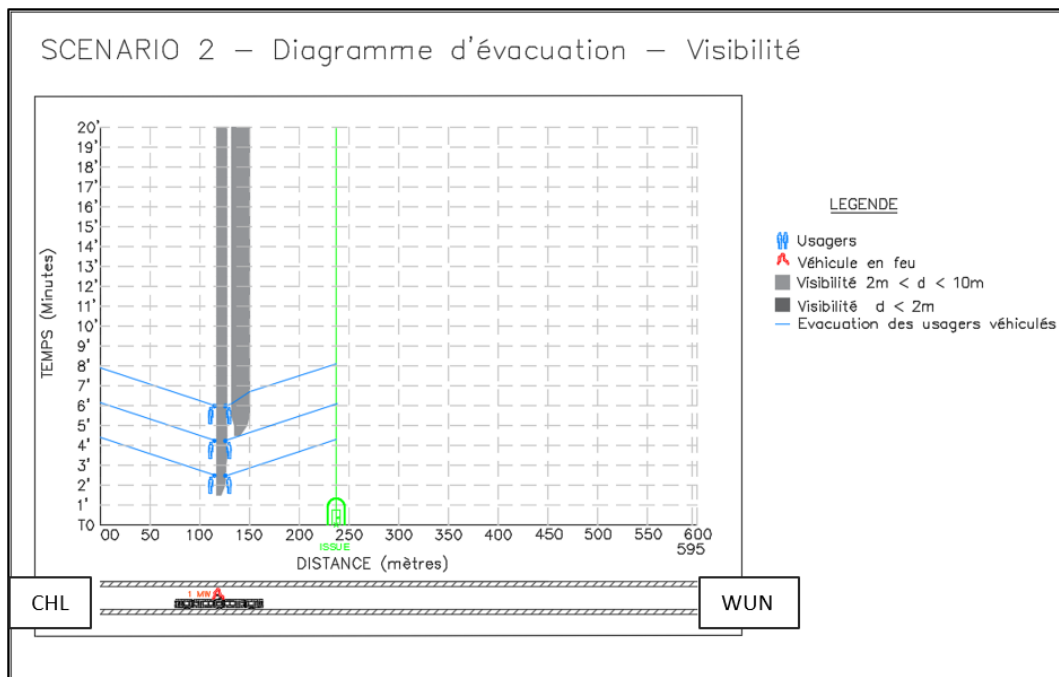


Figure 23 - Scénario 2 - Diagramme de visibilité



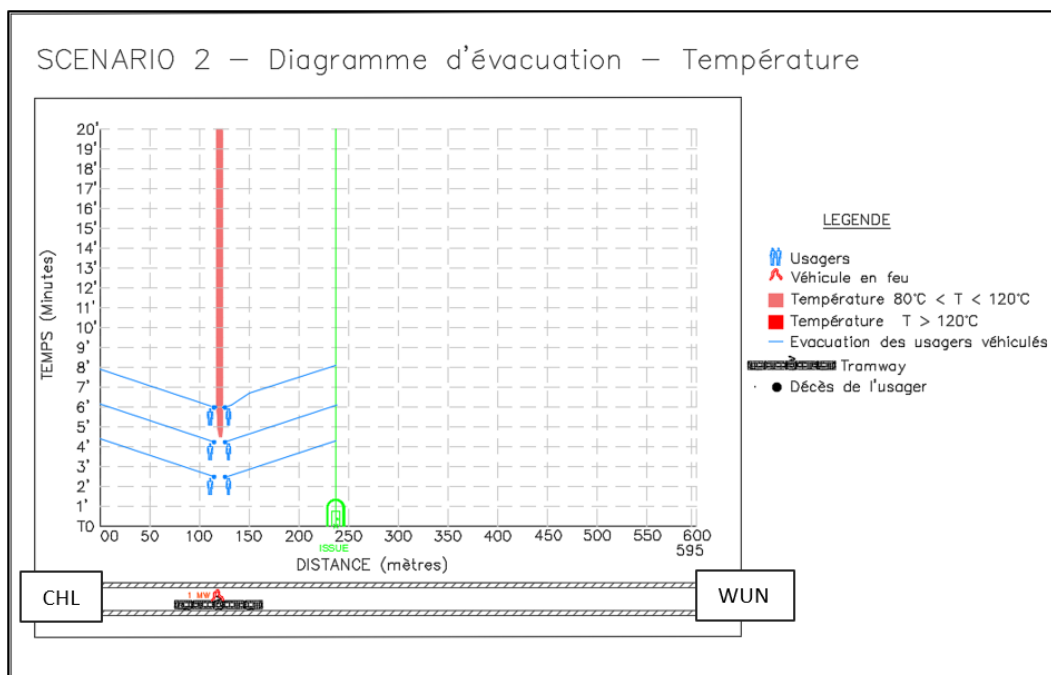


Figure 24 - Scénario 2 - Diagramme de température

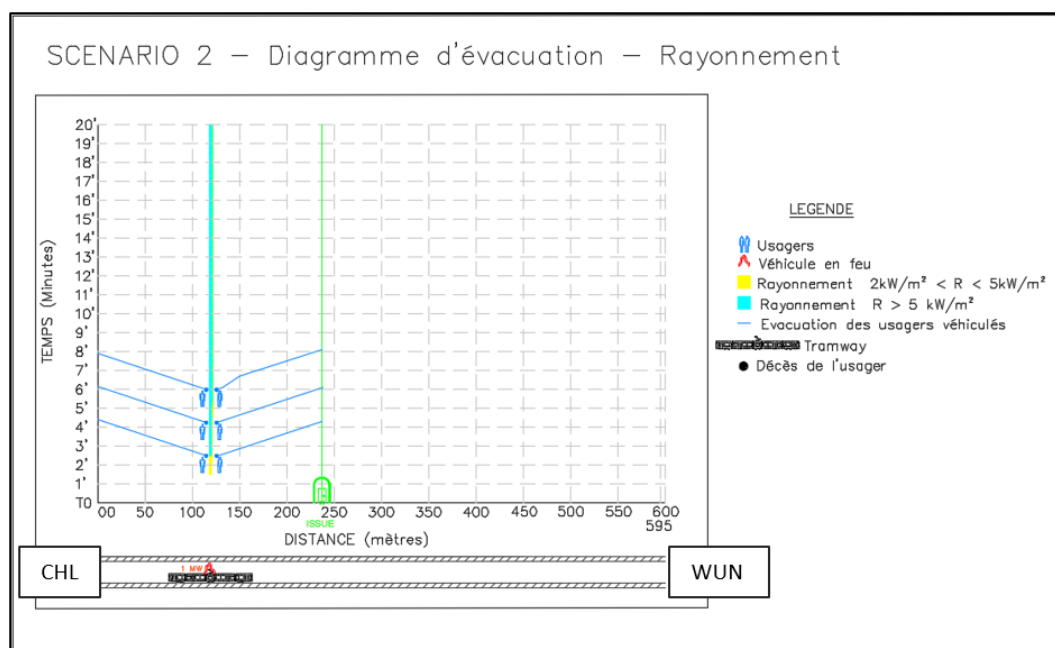


Figure 25 - Scénario 2 - Diagramme de rayonnement

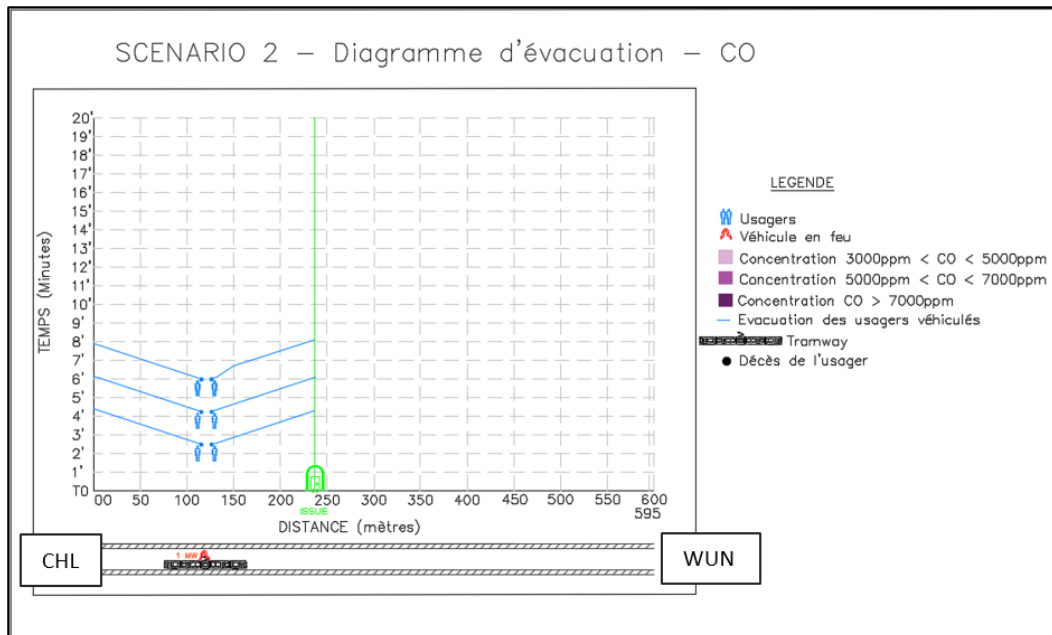


Figure 26 - Scénario 2 - Diagramme de concentration en CO

### Évolution de l'incendie et comportement des fumées

- Avant le début de l'incendie et due à la contrepression en tête CHL, la vitesse du courant d'air initiale dans la section de l'ouvrage est de l'ordre de 2,51 m/s dans le sens CHL vers WUN ;
- Dans les premières minutes d'incendie, les fumées se propagent majoritairement en partie haute, au-dessus du matériel roulant, de manière stratifiée (absence de fumée à hauteur d'Homme), vers la station WUN, sur une 50aine de mètres ;
- À t0 + 5 min, l'incendie a atteint sa puissance maximale ;
- Les fumées restent globalement stratifiées sur environ 146 mètres vers l'issue tout au long de la simulation, exceptées quelques retombées de fumées à l'arrière du tramway sur environ 25 mètres ;
- En dehors de la zone située à proximité immédiate de l'incendie, le niveau de température à hauteur d'Homme reste inférieur à 50°C sur l'ensemble de l'ouvrage ;
- La concentration en monoxyde de carbone dans tout le tunnel reste inférieure à 1200 ppm.

### Évacuation des usagers du tramway via la station CHL

- Les premiers usagers sortent du tramway 2 min 30 s après le début de l'incendie ;
- La distance à parcourir pour rejoindre la station CHL est d'environ 119 m ;
- L'absence de fumée entre la rame et la station leur permet de cheminer dans de bonnes conditions de visibilité, tout au long de l'évacuation ;
- Les premiers usagers atteignent la tête de sortie à partir de 4 min 23 s après le début de l'incendie ;
- Les derniers usagers atteignent la tête de sortie entre 6 min 08 s et 7 min 53 s, selon que les portes sont, respectivement, ouvertes des deux côtés ou d'un seul côté ;
- Nombre d'usagers évacués : 173 personnes.

### Évacuation des usagers du tramway via l'issue de secours

- Les premiers usagers sortent du tramway 2 min 30 s après le début de l'incendie ;
- La distance à parcourir pour rejoindre l'issue de secours est d'environ 118 m ;
- La stratification des fumées entre la rame et l'issue leur permet globalement de cheminer dans de bonnes conditions de visibilité, excepté pour les derniers usagers dans le cas de l'ouverture d'un seul côté des portes, qui rencontreront quelques retombées de fumées ;
- Les premiers usagers atteignent l'issue à partir de 4 min 20 s après le début de l'incendie ;
- Les derniers usagers atteignent l'issue entre 6 min 04 s et 8 min 07 s, selon que les portes sont, respectivement, ouvertes des deux côtés ou d'un seul côté ;
- Nombre d'usagers évacués : 172 personnes.

### Conditions d'intervention des services de secours

- En fonction des conditions de circulation, il est pris en considération que les secours arrivent 20 min après le début de l'incendie aux stations CHL et WUN, et au niveau de l'issue de secours ;
- Les services de secours peuvent intervenir sans difficulté depuis les stations et l'issue de secours compte tenu des bonnes conditions d'ambiance entre l'issue de secours et l'incendie.

## 4.3 Scénario 3 : incendie de 1 MW en milieu de rame, entre la station WUNNQUARTIER et l'issue de secours

### 4.3.1 Présentation du scénario

L'objectif de ce scénario incendie est d'analyser les conditions d'évacuation des usagers lors d'un incendie en milieu de rame dans le tunnel.

La puissance de l'incendie est de 1 MW (feu d'intercirculation) pour une rame arrêtée dans le tunnel entre la station WUNNQUARTIER et l'issue de secours.

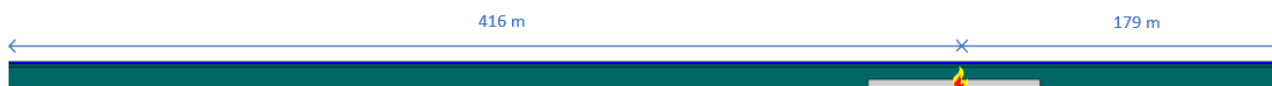


Figure 27 – Synoptique – Scénario 3

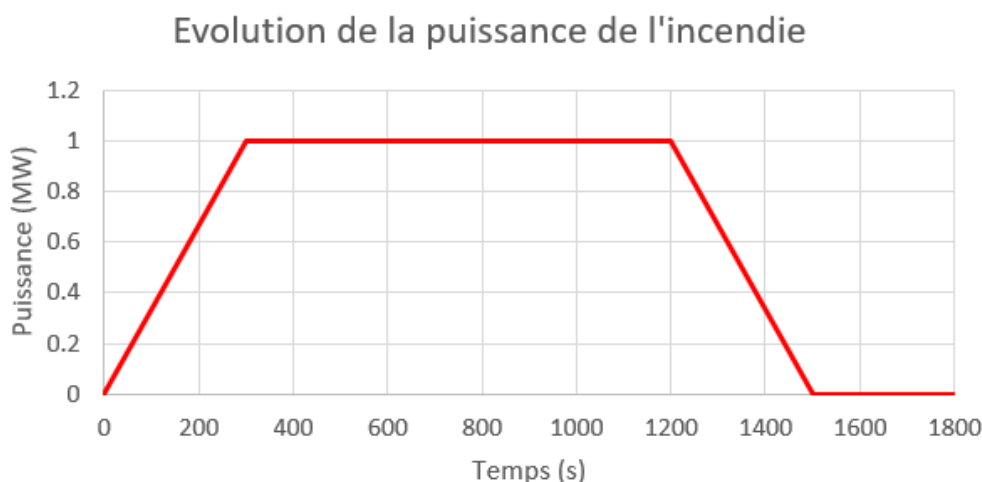


Figure 28 – Terme source – Scénario 3

## 4.3.2 Déroulement du scénario

Temps	Situation	Lieu	Conséquences	Dispositions équipements	Dispositions d'exploitation
T0	<b>Incendie</b> en milieu de Tramway	PM 179	Arrêt du trafic		
T0 + 1'	<b>Alerte</b> du conducteur de la rame par les usagers	PM 179	Le conducteur prend conscience de l'incident (présence de fumées, suspicion de blessés)		
T0+ 2'	Levée de doute et remontée d'alarme vers le PC de sécurité	PC			
T0 + 2'30"	Consignes données aux usagers	PM 179			L'opérateur alerte les services de secours
	Sortie du premier usager de la rame	PM 179			
T0 + 5'	L'incendie atteint sa puissance maximale	PM 179			
T0 + 7'30" OU T0 + 9'	Fin d'évacuation du dernier usager	Issue de secours	Tous les usagers sont hors de danger		
T0 + 20'	Arrivée des services de secours		Début reconnaissance dans l'ouvrage Recherche des témoins	Prises pompiers, niches incendie	Les services de secours prennent le contrôle des opérations
T0 + xx'	Fin de l'incident	Tunnel	Nettoyage de l'ouvrage, évaluation des dégâts		Evaluation des conditions de réouverture

#### 4.3.3 Analyse des conditions d'évacuation

L'évacuation des usagers pendant un incendie dépend de la visibilité et des paramètres définissant les zones de dangers. Les figures qui suivent présentent les conditions ambiantes en fonction du temps et de la position dans l'ouvrage. Ils doivent être analysés pour déterminer les temps d'évacuation des usagers ainsi que les conditions rencontrées durant cette phase.

La lecture du diagramme se fait comme suit :

- Le cheminement des usagers est représenté par les segments bleus ;
- Un segment vertical signifie que l'usager ne se déplace plus et représente son immobilisation. Un rond noir marque le décès potentiel de l'usager ;
- L'usager est considéré hors de danger lorsqu'il atteint les issues de secours ou les extrémités du tunnel.

Les diagrammes proposés sont construits à partir des résultats de la modélisation 3D sous FDS, qui sont présentés en détail en annexe. Les valeurs prises en compte sont celles à hauteur d'Homme, soit à une hauteur de 2 m.

Les figures suivantes présentent les différentes conditions d'évacuation à hauteur d'Homme dans le tunnel à partir du démarrage de l'incendie jusqu'à l'intervention des services de secours.

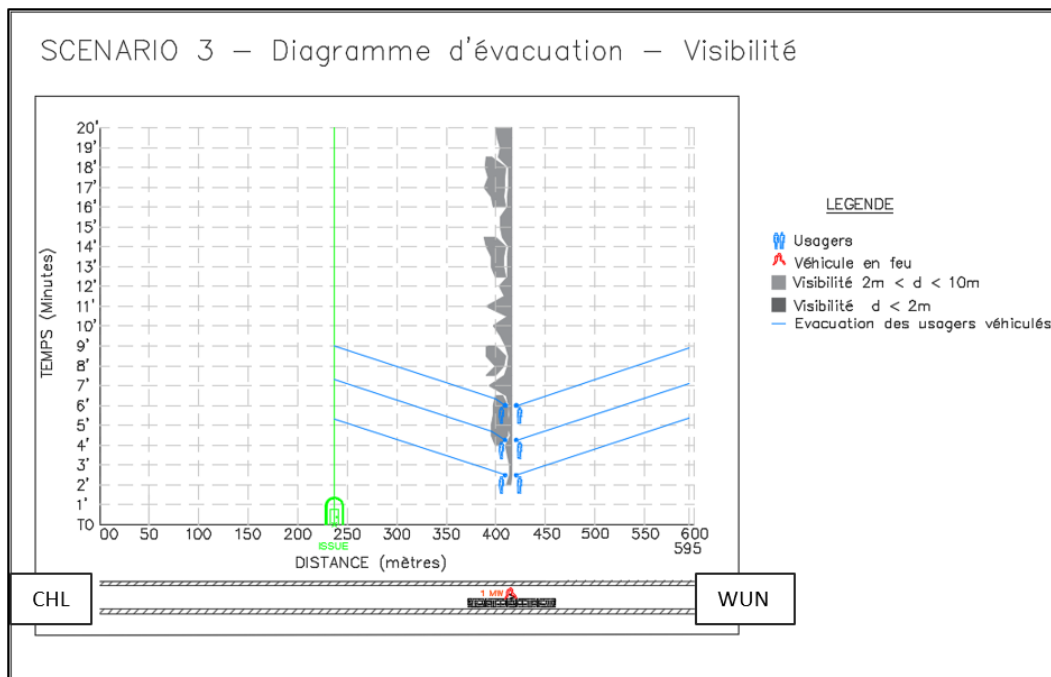


Figure 29 - Scénario 3 - Diagramme de visibilité

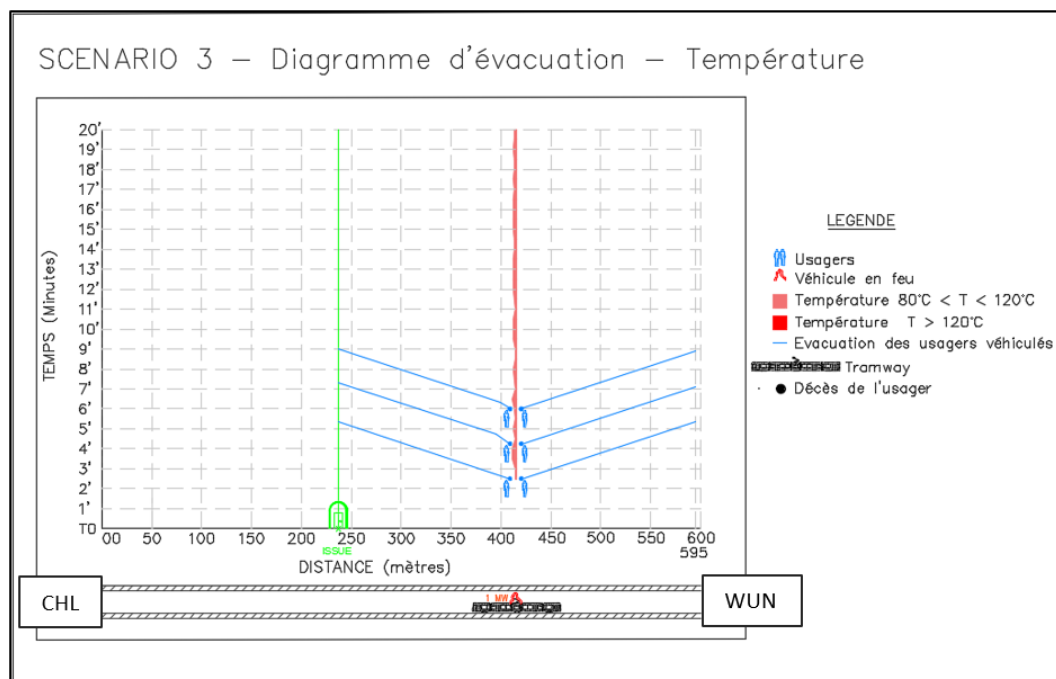


Figure 30 - Scénario 3 - Diagramme de température

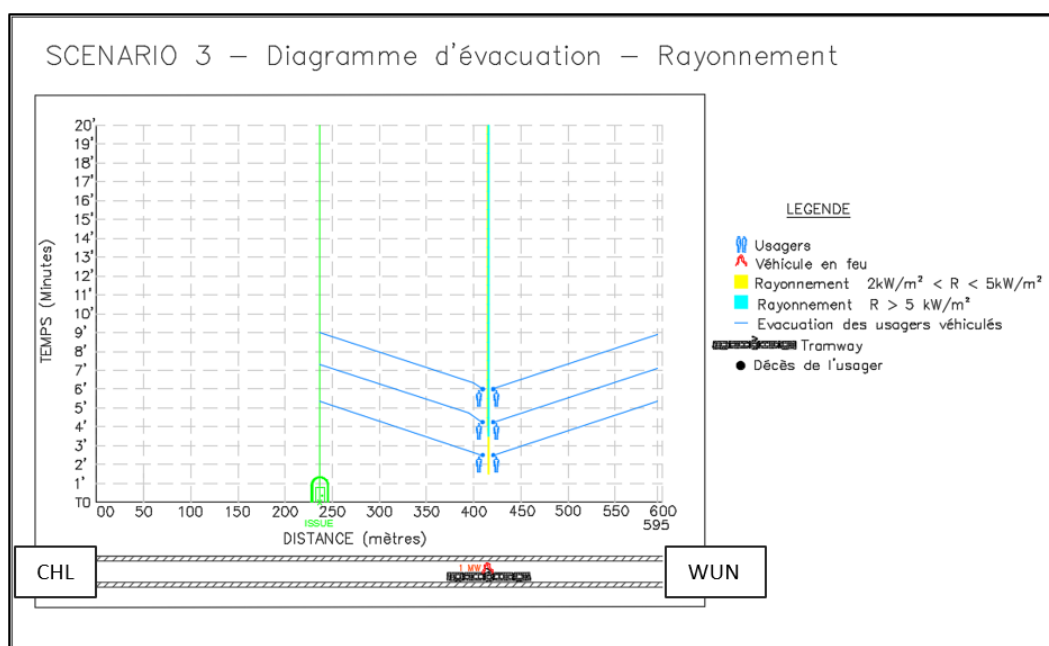


Figure 31 - Scénario 3 - Diagramme de rayonnement

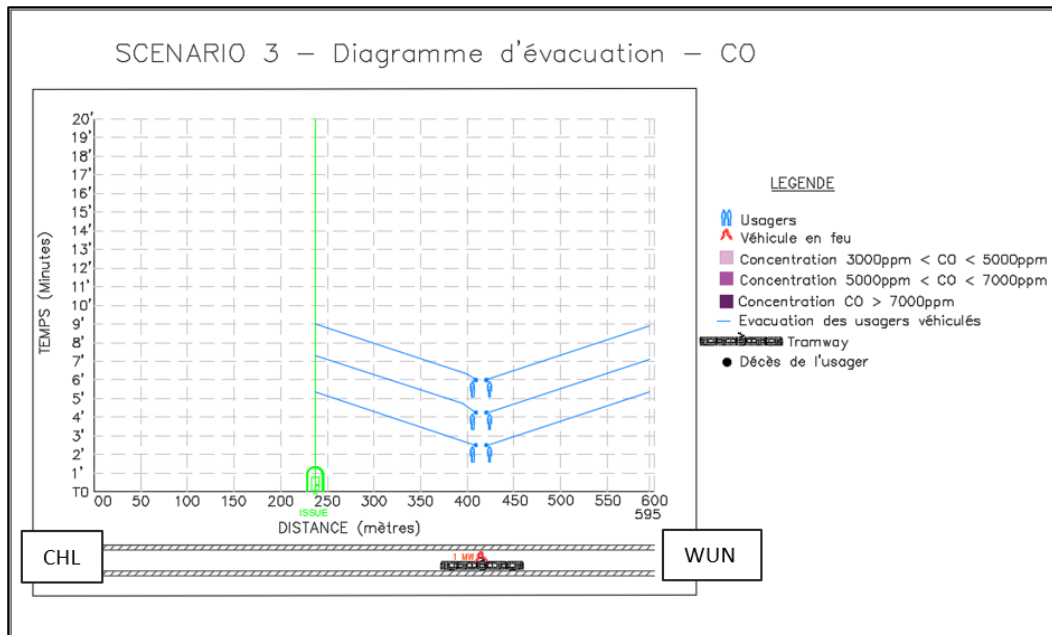


Figure 32 - Scénario 3 - Diagramme de concentration en CO

### Évolution de l'incendie et comportement des fumées

- Avant le début de l'incendie et due à la contrepression en tête WUN, la vitesse du courant d'air initiale dans la section de l'ouvrage est de l'ordre de 1,43 m/s dans le sens WUN vers CHL ;
- Dans les premières minutes d'incendie, les fumées se propagent majoritairement en partie haute, au-dessus du matériel roulant, de manière stratifiée (absence de fumée à hauteur d'Homme), vers la station CHL ;
- À  $t_0 + 5$  min, l'incendie a atteint sa puissance maximale ;
- Les fumées restent globalement stratifiées sur jusqu'en tête côté CHL (les fumées atteignent la tête côté CHL environ 9 min 30 s après le début de l'incendie), tout au long de la simulation, exceptées quelques retombées de fumées à l'arrière du tramway sur environ 25 mètres ;
- En dehors de la zone située à proximité immédiate de l'incendie, le niveau de température à hauteur d'Homme reste inférieur à  $50^\circ\text{C}$  sur l'ensemble de l'ouvrage ;
- La concentration en monoxyde de carbone dans tout le tunnel reste inférieure à 1200 ppm.

### Évacuation des usagers du tramway via la station WUN

- Les premiers usagers sortent du tramway 2 min 30 s après le début de l'incendie ;
- La distance à parcourir pour rejoindre la station WUN est d'environ 179 m ;
- L'absence de fumées entre la rame et la station leur permet de cheminer dans de bonnes conditions de visibilité, tout au long de l'évacuation ;
- Les premiers usagers atteignent la tête de sortie à partir de 5 min 23 s après le début de l'incendie ;
- Les derniers usagers atteignent la tête de sortie entre 7 min 08 s et 8 min 53 s, selon que les portes sont, respectivement, ouvertes des deux côtés ou d'un seul côté ;
- Nombre d'usagers évacués : 173 personnes.



### Évacuation des usagers du tramway via l'issue de secours

- Les premiers usagers sortent du tramway 2 min 30 s après le début de l'incendie ;
- La distance à parcourir pour rejoindre l'issue de secours est d'environ 179 m ;
- La stratification des fumées entre la rame et l'issue leur permet de cheminer dans de bonnes conditions de visibilité, excepté pour les derniers usagers qui rencontreront quelques retombées de fumées ;
- Les premiers usagers atteignent l'issue à partir de 5 min 20 s après le début de l'incendie ;
- Les derniers usagers atteignent l'issue entre 7 min 20 s et 9 min, selon que les portes sont, respectivement, ouvertes des deux côtés ou d'un seul côté ;
- Nombre d'usagers évacués : 172 personnes.

### Conditions d'intervention des services de secours

- En fonction des conditions de circulation, il est pris en considération que les secours arrivent 20 min après le début de l'incendie aux stations CHL et WUN, et au niveau de l'issue de secours ;
- Les services de secours peuvent intervenir sans difficulté depuis les stations et l'issue de secours compte tenu des bonnes conditions d'ambiance entre l'issue de secours et l'incendie.

## 4.4 Scénario 4 : incendie de 1 MW en tête de rame, entre la station WUNNQUARTIER et l'issue de secours

### 4.4.1 Présentation du scénario

L'objectif de ce scénario incendie est d'analyser les conditions d'évacuation des usagers lors d'un incendie en tête de rame dans le tunnel.

La puissance de l'incendie est de 1 MW (feu d'intercirculation) pour une rame arrêtée dans le tunnel entre la station WUNNQUARTIER et l'issue de secours.

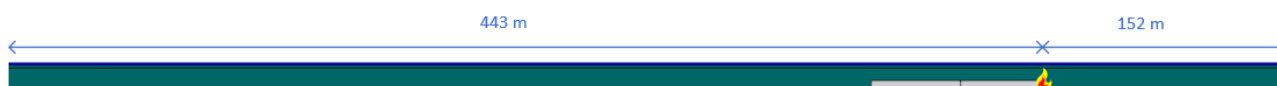


Figure 33 – Synoptique – Scénario 4

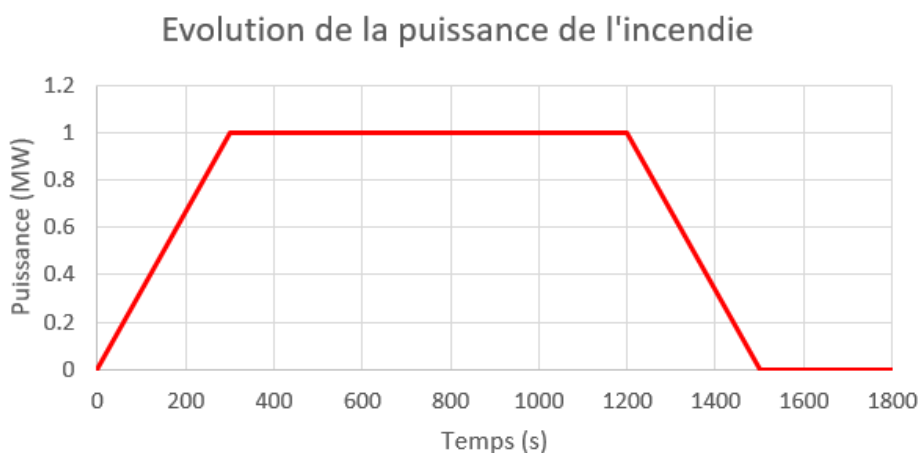


Figure 34 - Terme source - Scénario 4

## 4.4.2 Déroulement du scénario

Temps	Situation	Lieu	Conséquences	Dispositions équipements	Dispositions d'exploitation
T0	<b>Incendie</b> en tête de Tramway	PM 152	Arrêt du trafic		
T0 + 1'	<b>Alerte</b> du conducteur de la rame par les usagers	PM 152	Le conducteur prend conscience de l'incident (présence de fumées, suspicion de blessés)		
T0+ 2'	Levée de doute et remontée d'alarme vers le PC de sécurité	PC			
T0 + 2'30"	Consignes données aux usagers	PM 152			L'opérateur alerte les services de secours
	Sortie du premier usager de la rame	PM 152			
T0 + 5'	L'incendie atteint sa puissance maximale	PM 152			
T0 + 9'30" OU T0 + 13'	Fin d'évacuation du dernier usager	Issue de secours	Tous les usagers sont hors de danger		
T0 + 20'	Arrivée des services de secours		Début reconnaissance dans l'ouvrage Recherche des témoins	Prises pompiers, niches incendie	Les services de secours prennent le contrôle des opérations
T0 + xx'	Fin de l'incident	Tunnel	Nettoyage de l'ouvrage, évaluation des dégâts		Evaluation des conditions de réouverture

#### 4.4.3 Analyse des conditions d'évacuation

L'évacuation des usagers pendant un incendie dépend de la visibilité et des paramètres définissant les zones de dangers. Les figures qui suivent présentent les conditions ambiantes en fonction du temps et de la position dans l'ouvrage. Ils doivent être analysés pour déterminer les temps d'évacuation des usagers ainsi que les conditions rencontrées durant cette phase.

La lecture du diagramme se fait comme suit :

- Le cheminement des usagers est représenté par les segments bleus ;
- Un segment vertical signifie que l'usager ne se déplace plus et représente son immobilisation. Un rond noir marque le décès potentiel de l'usager ;
- L'usager est considéré hors de danger lorsqu'il atteint les issues de secours ou les extrémités du tunnel.

Les diagrammes proposés sont construits à partir des résultats de la modélisation 3D sous FDS, qui sont présentés en détail en annexe. Les valeurs prises en compte sont celles à hauteur d'Homme, soit à une hauteur de 2 m.

Les figures suivantes présentent les différentes conditions d'évacuation à hauteur d'Homme dans le tunnel à partir du démarrage de l'incendie jusqu'à l'intervention des services de secours.

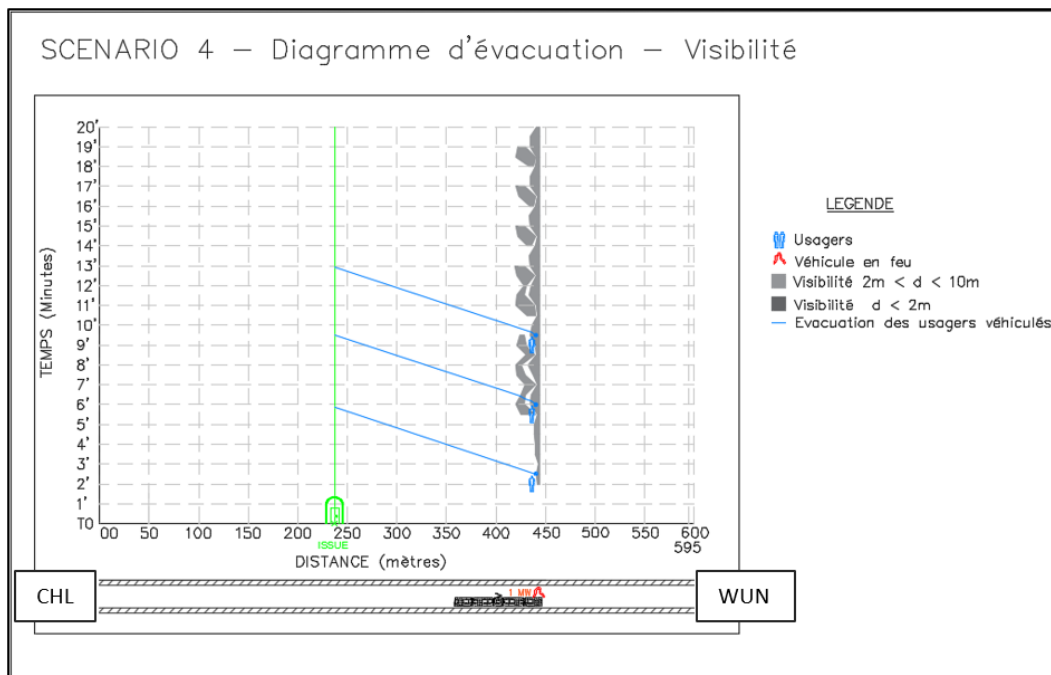


Figure 35 - Scénario 4 - Diagramme de visibilité

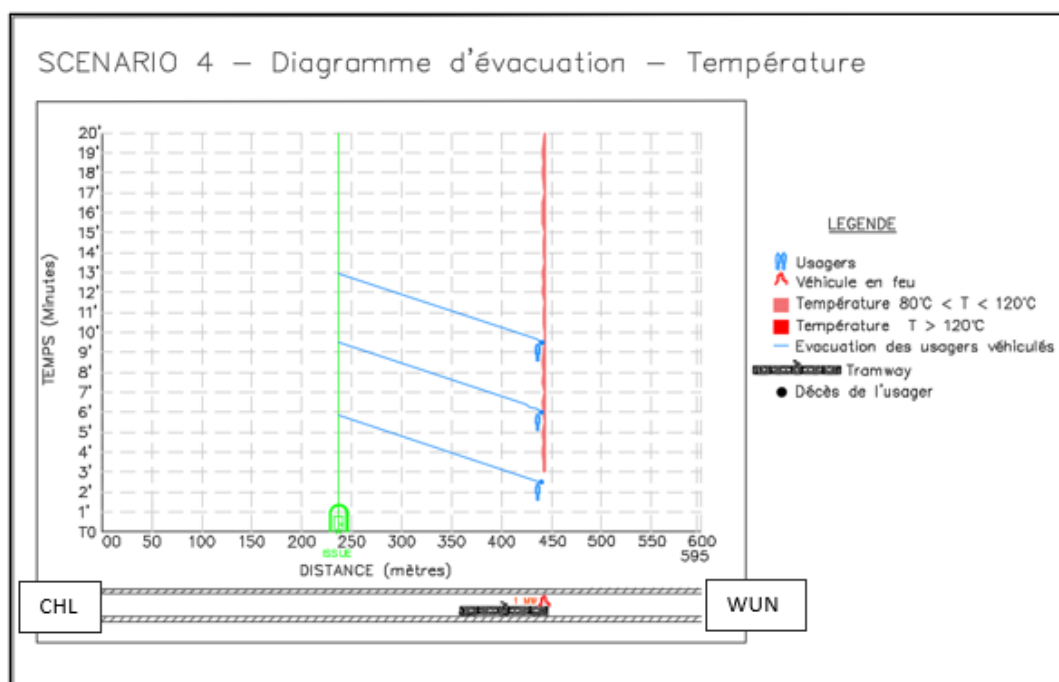


Figure 36 - Scénario 4 - Diagramme de température

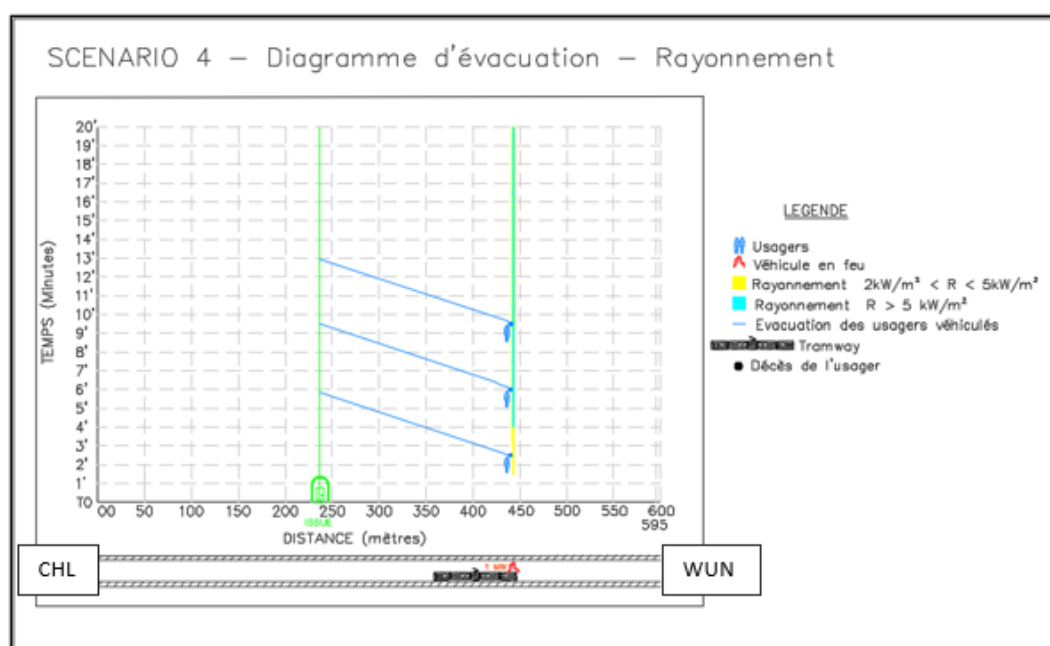


Figure 37 - Scénario 4 - Diagramme de rayonnement

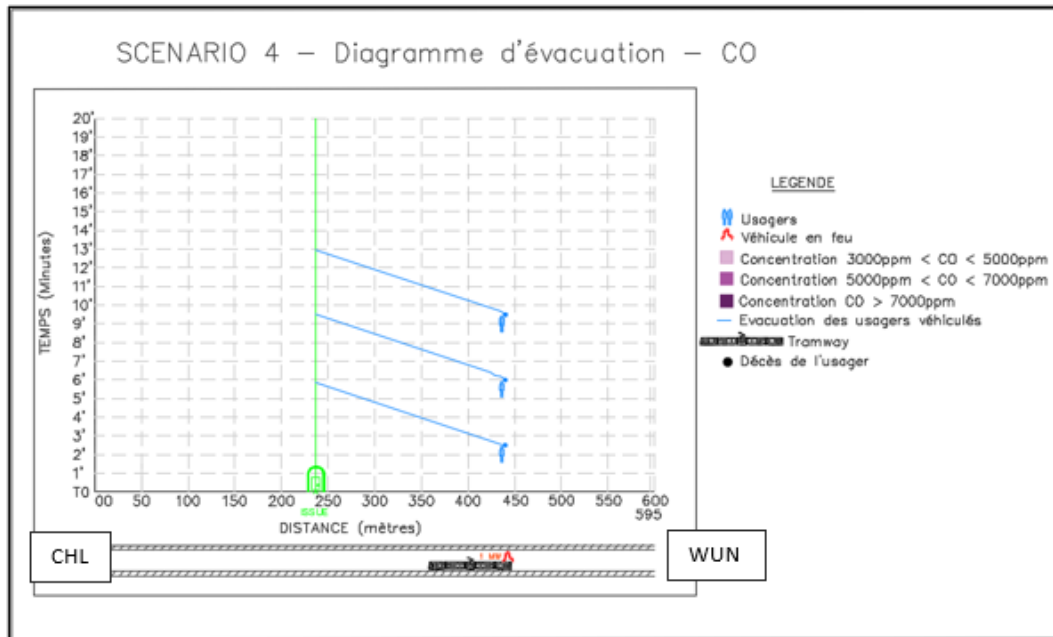


Figure 38 - Scénario 4 - Diagramme de concentration en CO

### Évolution de l'incendie et comportement des fumées

- Avant le début de l'incendie et due à la contrepression en tête WUN, la vitesse du courant d'air initiale dans la section de l'ouvrage est de l'ordre de 1,43 m/s dans le sens WUN vers CHL ;
- Dans les premières minutes d'incendie, les fumées se propagent majoritairement en partie haute, au-dessus du matériel roulant, de manière stratifiée (absence de fumée à hauteur d'Homme), vers la station CHL ;
- À  $t_0 + 5$  min, l'incendie a atteint sa puissance maximale ;
- Les fumées restent globalement stratifiées sur jusqu'en tête côté CHL (les fumées atteignent la tête côté CHL environ 12 min 30 s après le début de l'incendie), tout au long de la simulation, exceptées quelques retombées de fumées le long du tramway sur environ 25 mètres ;
- En dehors de la zone située à proximité immédiate de l'incendie, le niveau de température à hauteur d'Homme reste inférieur à 50°C sur l'ensemble de l'ouvrage ;
- La concentration en monoxyde de carbone dans tout le tunnel reste inférieure à 1200 ppm.

### Évacuation des usagers du tramway via la station WUN

- Aucun usager n'évacue par la station WUN pour ne pas passer devant l'incendie en évacuant.

### Évacuation des usagers du tramway via l'issue de secours

- Les premiers usagers sortent du tramway 2 min 30 s après le début de l'incendie ;
- La distance à parcourir pour rejoindre l'issue de secours est d'environ 206 m ;
- La stratification des fumées entre la rame et l'issue leur permet de cheminer dans de bonnes conditions de visibilité, excepté pour les derniers usagers qui rencontreront quelques retombées de fumées ;
- Les premiers usagers atteignent l'issue à partir de 5 min 50 s après le début de l'incendie ;
- Les derniers usagers atteignent l'issue entre 9 min 30 s et 12 min 55 s, selon que les portes sont, respectivement, ouvertes des deux côtés ou d'un seul côté ;
- Nombre d'usagers évacués : 345 personnes.

### Conditions d'intervention des services de secours

- En fonction des conditions de circulation, il est pris en considération que les secours arrivent 20 min après le début de l'incendie aux stations CHL et WUN, et au niveau de l'issue de secours ;
- Les services de secours peuvent intervenir sans difficulté depuis les stations et l'issue de secours compte tenu des bonnes conditions d'ambiance entre l'issue de secours et l'incendie.

## 4.5 Scénario 5 : incendie de 10 MW sur toute la rame, entre la station CHL et l'issue de secours

### 4.5.1 Présentation du scénario

L'objectif de ce scénario incendie est d'analyser les conditions d'évacuation des usagers lors d'un incendie sur toute la rame dans le tunnel.

La puissance de l'incendie est de 10 MW pour une rame arrêtée dans le tunnel entre la station CHL et l'issue de secours.



Figure 39 - Synoptique - Scénario 5

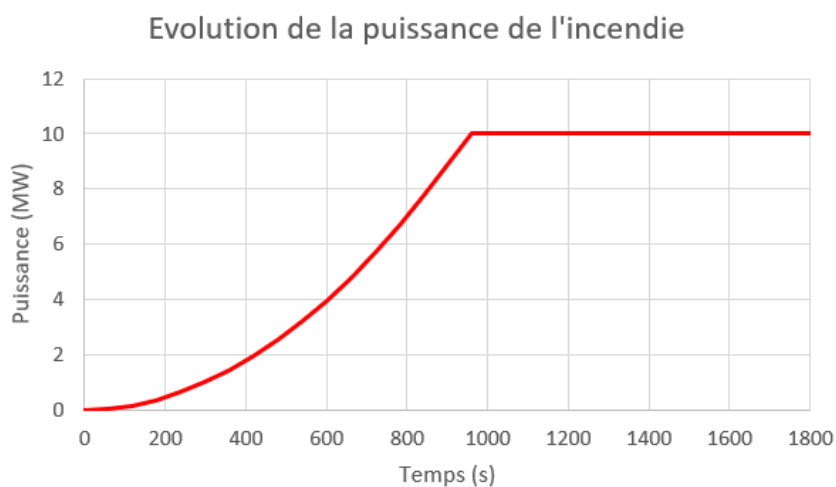


Figure 40 - Terme source - Scénario 5

## 4.5.2 Déroulement du scénario

Temps	Situation	Lieu	Conséquences	Dispositions équipements	Dispositions d'exploitation
T0	<b>Incendie</b> de Tramway	PM 449-505	Arrêt du trafic		
T0 + 1'	<b>Alerte</b> du conducteur de la rame par les usagers	PM 449-505	Le conducteur prend conscience de l'incident (présence de fumées, suspicion de blessés)		
T0+ 2'	Levée de doute et remontée d'alarme vers le PC de sécurité	PC			
T0 + 2'30"	Consignes données aux usagers	PM 449-505			L'opérateur alerte les services de secours
	Sortie du premier usager de la rame	PM 449-505			
T0 + 9' OU T0 + 12'30"	Fin d'évacuation du dernier usager	Issue de secours	Tous les usagers sont hors de danger		
T0 + 15'50"	L'incendie atteint sa puissance maximale	PM 449-505			
T0 + 20'	Arrivée des services de secours		Début reconnaissance dans l'ouvrage Recherche des témoins	Prises pompiers, niches incendie	Les services de secours prennent le contrôle des opérations
T0 + xx'	Fin de l'incident	Tunnel	Nettoyage de l'ouvrage, évaluation des dégâts		Evaluation des conditions de réouverture



#### 4.5.3 Analyse des conditions d'évacuation

L'évacuation des usagers pendant un incendie dépend de la visibilité et des paramètres définissant les zones de dangers. Les figures qui suivent présentent les conditions ambiantes en fonction du temps et de la position dans l'ouvrage. Ils doivent être analysés pour déterminer les temps d'évacuation des usagers ainsi que les conditions rencontrées durant cette phase.

La lecture du diagramme se fait comme suit :

- Le cheminement des usagers est représenté par les segments bleus ;
- Un segment vertical signifie que l'usager ne se déplace plus et représente son immobilisation. Un rond noir marque le décès potentiel de l'usager ;
- L'usager est considéré hors de danger lorsqu'il atteint les issues de secours ou les extrémités du tunnel.

Les diagrammes proposés sont construits à partir des résultats de la modélisation 3D sous FDS, qui sont présentés en détail en annexe. Les valeurs prises en compte sont celles à hauteur d'Homme, soit à une hauteur de 2 m.

Les figures suivantes présentent les différentes conditions d'évacuation à hauteur d'Homme dans le tunnel à partir du démarrage de l'incendie jusqu'à l'intervention des services de secours.

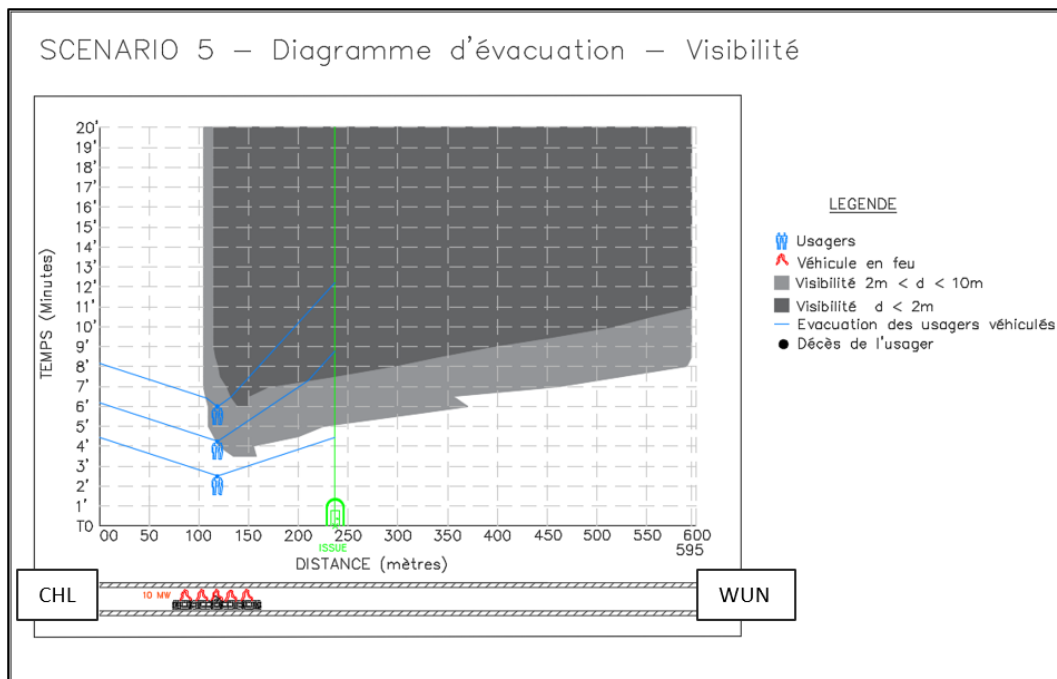


Figure 41 - Scénario 5 - Diagramme de visibilité

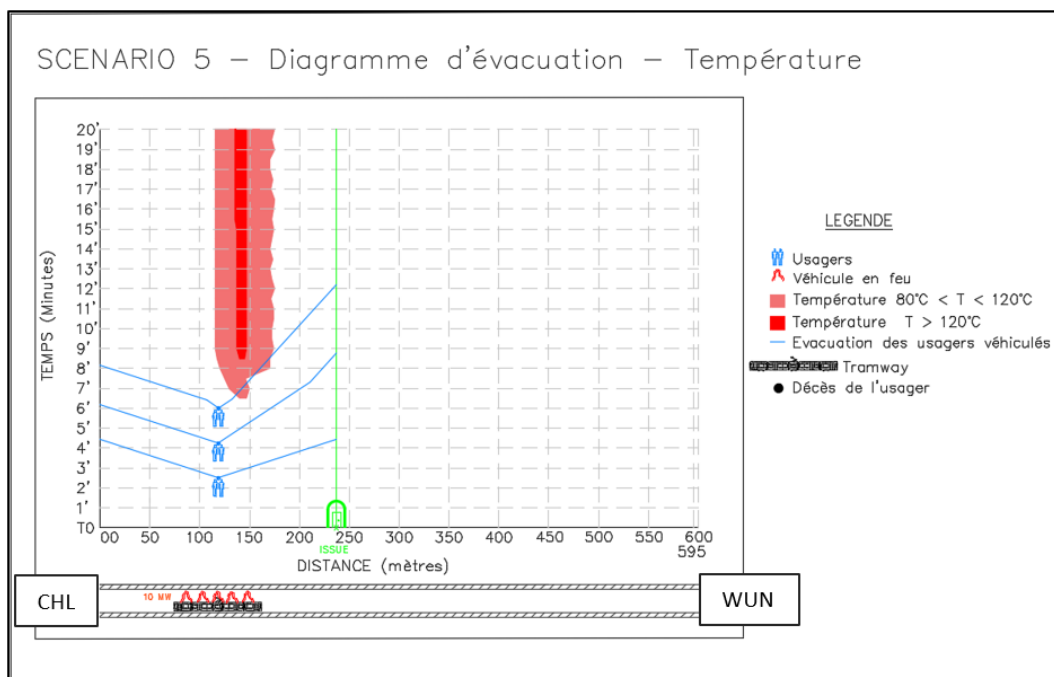


Figure 42 - Scénario 5 - Diagramme de température

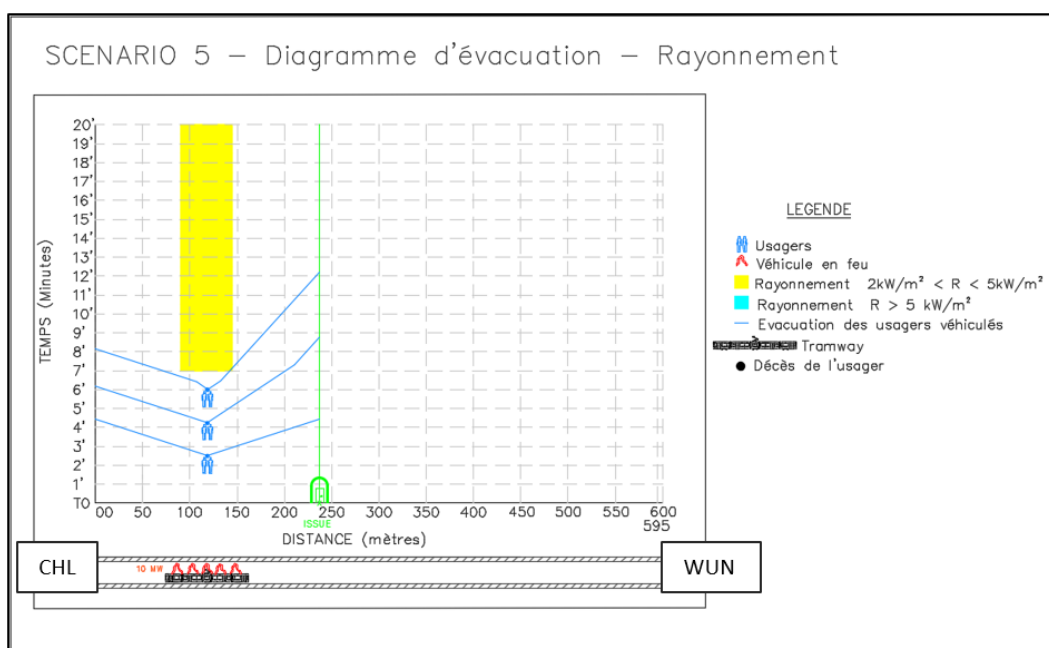


Figure 43 - Scénario 5 - Diagramme de rayonnement

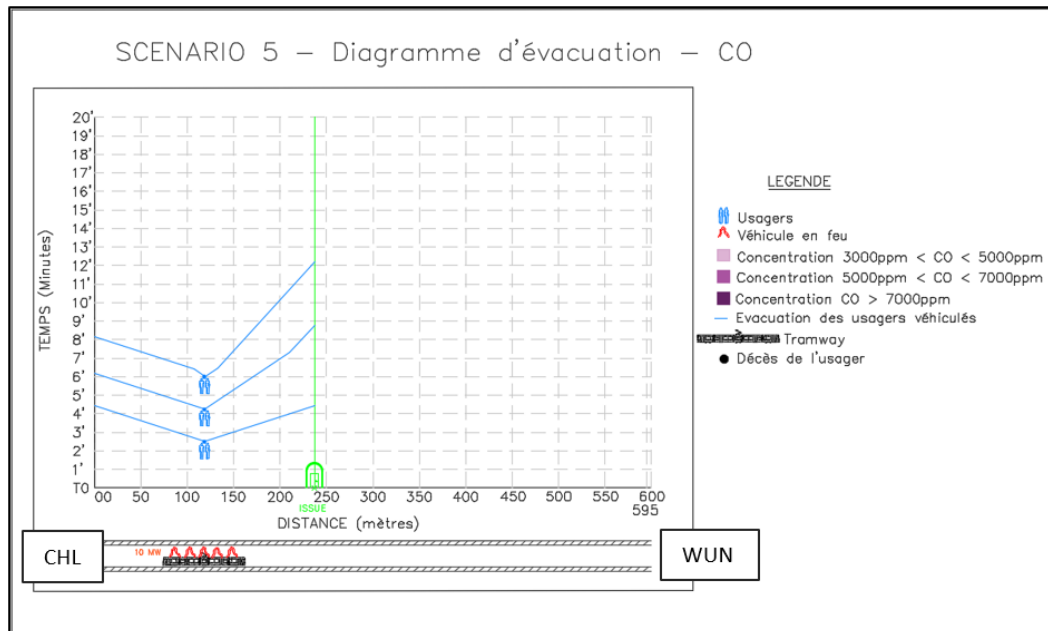


Figure 44 - Scénario 5 - Diagramme de concentration en CO

### Évolution de l'incendie et comportement des fumées

- Avant le début de l'incendie et due à la contrepression en tête CHL, la vitesse du courant d'air initiale dans la section de l'ouvrage est de l'ordre de 2,51 m/s dans le sens CHL vers WUN ;
- Dès les premières minutes d'incendie, les fumées se propagent majoritairement en partie haute, au-dessus du matériel roulant, de manière stratifiée (absence de fumée à hauteur d'Homme), vers la station WUN ;
- Les fumées retombent jusqu'en tête côté WUN (les fumées atteignent la tête côté WUN environ 7 min 30 s après le début de l'incendie), tout au long de la simulation, ralentissant l'évacuation des usagers qui évacuent vers l'issue ;
- À  $t_0 + 15 \text{ min } 50 \text{ s}$ , l'incendie a atteint sa puissance maximale ;
- La température au niveau de l'incendie est supérieure à  $120^\circ\text{C}$ , et supérieure à  $80^\circ\text{C}$  sur un linéaire d'environ 100 m vers l'issue. À hauteur d'Homme, seules quelques retombées de fumées chaudes sont rencontrées par les derniers usagers évacuant vers l'issue, dans le cas d'ouverture des portes d'un seul côté ;
- La concentration en monoxyde de carbone dans tout le tunnel reste inférieure à 1200 ppm.

### Évacuation des usagers du tramway via la station CHL

- Les premiers usagers sortent du tramway 2 min 30 s après le début de l'incendie ;
- La distance à parcourir pour rejoindre la station CHL est d'environ 119 m ;
- L'absence de fumée entre la rame et la station leur permet de cheminer dans de bonnes conditions de visibilité, tout au long de l'évacuation ;
- Les premiers usagers atteignent la tête de sortie à partir de 4 min 27 s après le début de l'incendie ;
- Les derniers usagers atteignent la tête de sortie entre 6 min 12 s et 8 min 11 s, selon que les portes sont, respectivement, ouvertes des deux côtés ou d'un seul côté ;
- Nombre d'usagers évacués : 173 personnes.

**Évacuation des usagers du tramway via l'issue de secours**

- Les premiers usagers sortent du tramway 2 min 30 s après le début de l'incendie ;
- La distance à parcourir pour rejoindre l'issue de secours est d'environ 118 m ;
- Les retombées de fumées entre la rame et l'issue ralentissent considérablement l'évacuation des usagers (fumées très denses rencontrées par les derniers usagers) ;
- Les premiers usagers atteignent l'issue à partir de 4 min 27 s après le début de l'incendie ;
- Les derniers usagers atteignent l'issue entre 8 min 47 s et 12 min 13 s, selon que les portes sont, respectivement, ouvertes des deux côtés ou d'un seul côté ;
- Les derniers usagers évacuant dans le cas d'une ouverture des portes d'un seul côté seront ponctuellement soumis à des températures de l'ordre de 80°C, sans pour autant causer une incapacité d'auto-évacuation (moins de 15 min dans la zone dangereuse) ;
- Nombre d'usagers évacués : 172 personnes.

**Conditions d'intervention des services de secours**

- En fonction des conditions de circulation, il est pris en considération que les secours arrivent 20 min après le début de l'incendie aux stations CHL et WUN, et au niveau de l'issue de secours ;
- Les services de secours peuvent intervenir sans difficulté depuis la station CHL mais rencontreront des fumées opaques et déstratifiées en intervenant via l'issue de secours ou la tête WUN. Le désenfumage pourra être mis en route afin de repousser les fumées pour permettre l'intervention par l'accès souhaité.

#### 4.6 Scénario 6 : incendie de 10 MW sur toute la rame, entre la station WUNNQUARTIER et l'issue de secours

##### 4.6.1 Présentation du scénario

L'objectif de ce scénario incendie est d'analyser les conditions d'évacuation des usagers lors d'un incendie sur toute la rame dans le tunnel.

La puissance de l'incendie est de 10 MW pour une rame arrêtée dans le tunnel entre la station WUNNQUARTIER et l'issue de secours.

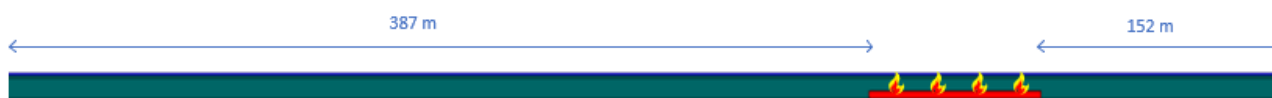


Figure 45 - Synoptique - Scénario 6

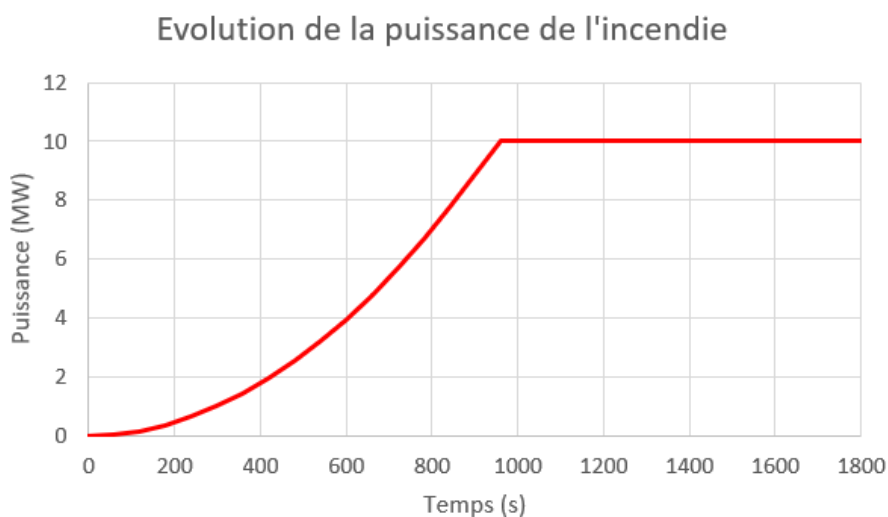


Figure 46 - Terme source - Scénario 6

## 4.6.2 Déroulement du scénario

Temps	Situation	Lieu	Conséquences	Dispositions équipements	Dispositions d'exploitation
T0	<b>Incendie</b> de Tramway	PM 152-208	Arrêt du trafic		
T0 + 1'	<b>Alerte</b> du conducteur de la rame par les usagers	PM 152-208	Le conducteur prend conscience de l'incident (présence de fumées, suspicion de blessés)		
T0+ 2'	Levée de doute et remontée d'alarme vers le PC de sécurité	PC			
T0 + 2'30"	Consignes données aux usagers	PM 152-208			L'opérateur alerte les services de secours
	Sortie du premier usager de la rame	PM 152-208			
T0 + 9'30" OU T0 + 10'30"	Fin d'évacuation du dernier usager	Tête WUN OU Issue de secours	Tous les usagers sont hors de danger		
T0 + 15'50"	L'incendie atteint sa puissance maximale	PM 152-208			
T0 + 20'	Arrivée des services de secours		Début reconnaissance dans l'ouvrage Recherche des témoins	Prises pompiers, niches incendie	Les services de secours prennent le contrôle des opérations
T0 + xx'	Fin de l'incident	Tunnel	Nettoyage de l'ouvrage, évaluation des dégâts		Evaluation des conditions de réouverture

#### 4.6.3 Analyse des conditions d'évacuation

L'évacuation des usagers pendant un incendie dépend de la visibilité et des paramètres définissant les zones de dangers. Les figures qui suivent présentent les conditions ambiantes en fonction du temps et de la position dans l'ouvrage. Ils doivent être analysés pour déterminer les temps d'évacuation des usagers ainsi que les conditions rencontrées durant cette phase.

La lecture du diagramme se fait comme suit :

- Le cheminement des usagers est représenté par les segments bleus ;
- Un segment vertical signifie que l'usager ne se déplace plus et représente son immobilisation. Un rond noir marque le décès potentiel de l'usager ;
- L'usager est considéré hors de danger lorsqu'il atteint les issues de secours ou les extrémités du tunnel.

Les diagrammes proposés sont construits à partir des résultats de la modélisation 3D sous FDS, qui sont présentés en détail en annexe. Les valeurs prises en compte sont celles à hauteur d'Homme, soit à une hauteur de 2 m.

Les figures suivantes présentent les différentes conditions d'évacuation à hauteur d'Homme dans le tunnel à partir du démarrage de l'incendie jusqu'à l'intervention des services de secours.

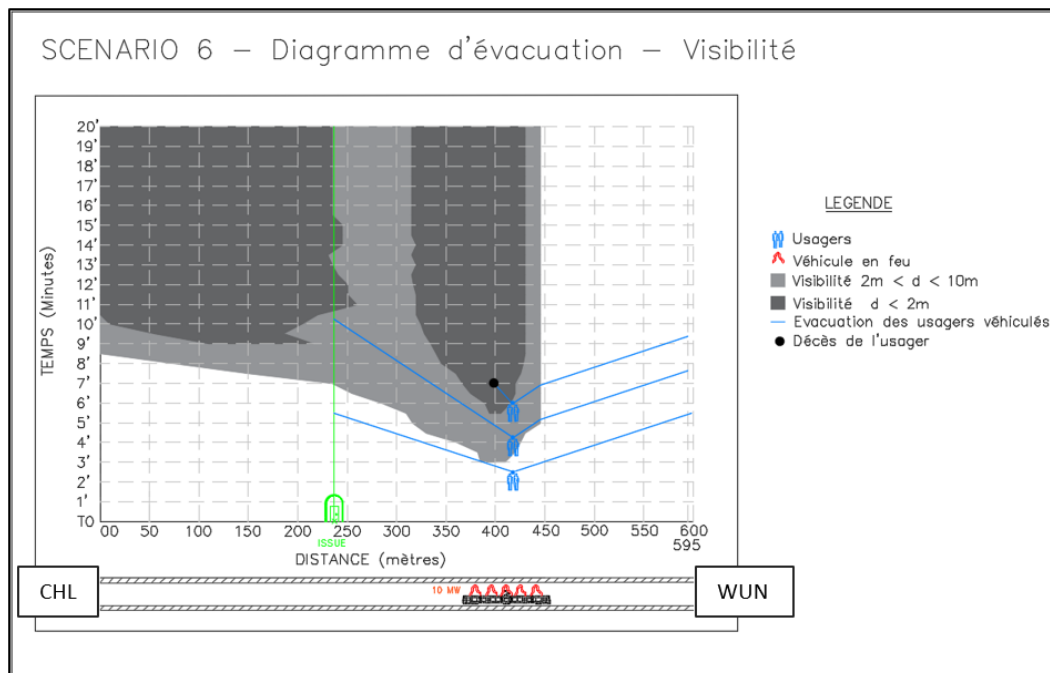


Figure 47 - Scénario 6 - Diagramme de visibilité



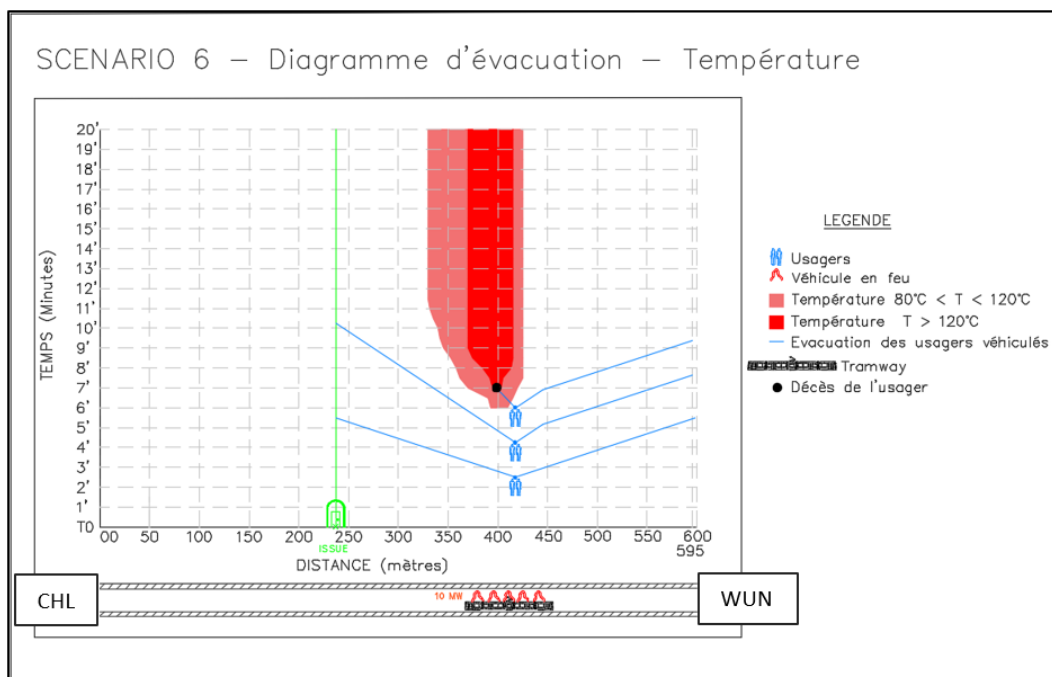


Figure 48 - Scénario 6 - Diagramme de température

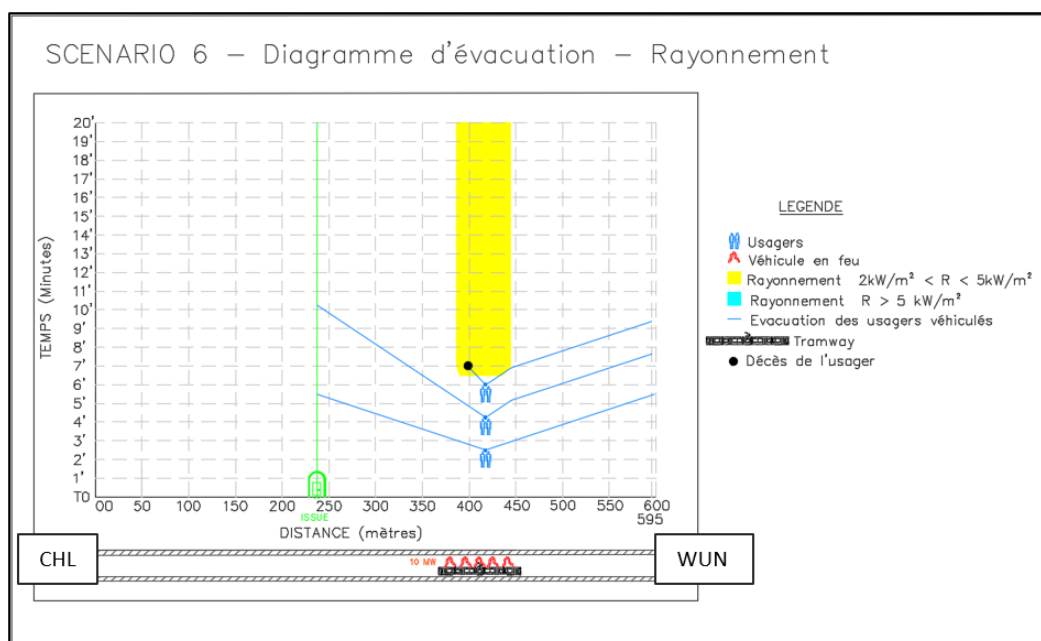


Figure 49 - Scénario 6 - Diagramme de rayonnement

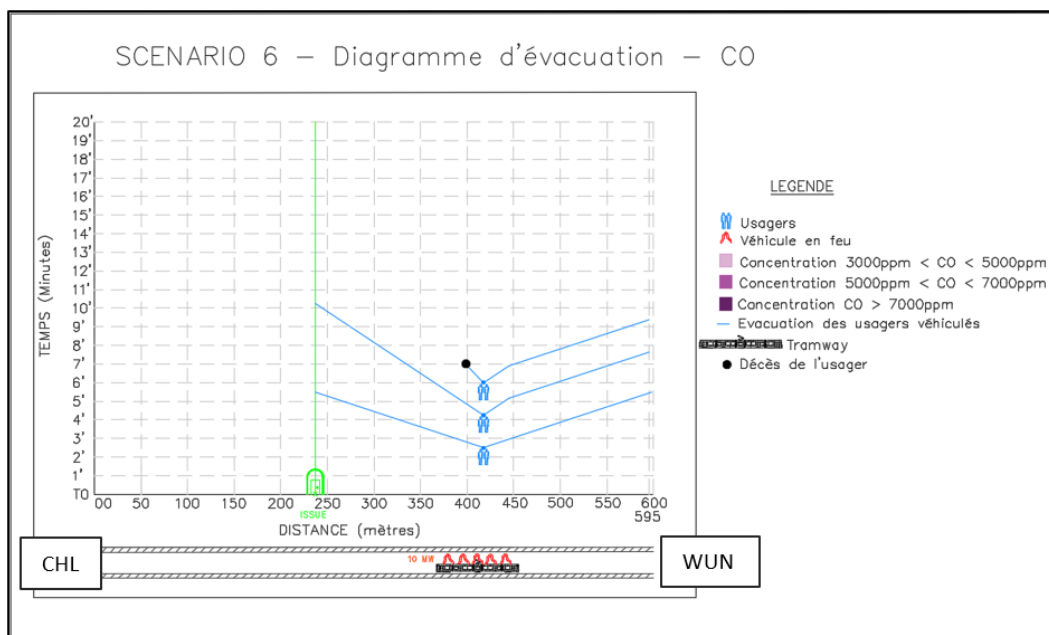


Figure 50 - Scénario 6 - Diagramme de concentration en CO

### Évolution de l'incendie et comportement des fumées

- Avant le début de l'incendie et due à la contrepression en tête WUN, la vitesse du courant d'air initiale dans la section de l'ouvrage est de l'ordre de 1,43 m/s dans le sens WUN vers CHL ;
- Dès les premières minutes d'incendie, les fumées se propagent majoritairement en partie haute, au-dessus du matériel roulant, de manière stratifiée (absence de fumée à hauteur d'Homme), vers la station CHL ;
- Les fumées retombent jusqu'en tête côté CHL (les fumées atteignent la tête côté CHL environ 5 min après le début de l'incendie), tout au long de la simulation, ralentissant l'évacuation des usagers qui évacuent vers l'issue ;
- À  $t_0 + 15 \text{ min } 50 \text{ s}$ , l'incendie a atteint sa puissance maximale ;
- La température au niveau de l'incendie est supérieure à  $120^\circ\text{C}$ , et supérieure à  $80^\circ\text{C}$  sur un linéaire d'environ 150 m vers l'issue. À hauteur d'Homme, des retombées de fumées chaudes sont rencontrées par les derniers usagers évacuant vers l'issue, dans le cas d'ouverture des portes d'un seul côté ;
- La concentration en monoxyde de carbone dans tout le tunnel reste inférieure à 1200 ppm.

### Évacuation des usagers du tramway via la station WUN

- Les premiers usagers sortent du tramway 2 min 30 s après le début de l'incendie ;
- La distance à parcourir pour rejoindre la station WUN est d'environ 179 m ;
- L'absence de fumée entre la rame et la station leur permet de cheminer dans de bonnes conditions de visibilité, tout au long de l'évacuation ;
- Les premiers usagers atteignent la tête de sortie à partir de 5 min 26 s après le début de l'incendie ;
- Les derniers usagers atteignent la tête de sortie entre 7 min 38 s et 9 min 23 s, selon que les portes sont, respectivement, ouvertes des deux côtés ou d'un seul côté ;
- Nombre d'usagers évacués : 173 personnes.

### Évacuation des usagers du tramway via l'issue de secours

- Les premiers usagers sortent du tramway 2 min 30 s après le début de l'incendie ;
- La distance à parcourir pour rejoindre l'issue de secours est d'environ 179 m ;

- Les retombées de fumées entre la rame et l'issue ralentissent considérablement l'évacuation des usagers (fumées très denses rencontrées par les derniers usagers) ;
- Les premiers usagers atteignent l'issue à partir de 5 min 29 s après le début de l'incendie ;
- Les derniers usagers atteignent l'issue après 10 min 16 s dans le cas où les portes sont ouvertes des deux côtés. Si les portes ne sont ouvertes que d'un seul côté, les derniers usagers rencontrent des conditions de température létales ( $T^{\circ} > 120^{\circ}\text{C}$ ) ;
- Nombre d'usagers évacués dans le cas d'ouverture des portes d'un seul côté : moins de 172 personnes (décès des derniers usagers) ;
- Nombre d'usagers évacués dans le cas d'ouverture des portes des deux côtés : 172 personnes.

#### **Conditions d'intervention des services de secours**

- En fonction des conditions de circulation, il est pris en considération que les secours arrivent 20 min après le début de l'incendie aux stations CHL et WUN, et au niveau de l'issue de secours ;
- Les services de secours peuvent intervenir sans difficulté depuis la station WUN mais rencontreront des fumées opaques et déstratifiées en intervenant via l'issue de secours ou la tête CHL. Le désenfumage pourra être mis en route afin de repousser les fumées pour permettre l'intervention par l'accès souhaité.

## 5 SYNTHÈSE DES SCÉNARIOS

### 5.1 Synthèse du scénario 1

Ce scénario d'incendie de puissance de 1 MW permet d'évaluer les conditions d'évacuation face à un incendie en début de rame entre la station CHL et l'issue de secours.

Les usagers se dirigeant vers l'issue peuvent évacuer dans de bonnes conditions, sans être impactés par les fumées.

En complément :

- Le rayonnement thermique dépasse la valeur seuil de 2 kW/m<sup>2</sup> au niveau de l'incendie. Aucun usager n'est confronté à ces conditions extrêmes lors de l'évacuation ;
- Aucun usager n'est soumis à des niveaux de température, concentration en CO ou rayonnement potentiellement létaux ;
- Le dernier usager du tramway évacuant vers l'issue est hors de danger environ 8 min 30 s après le début de l'incendie dans le cas de l'ouverture des deux côtés des portes, et 12 min après le début de l'incendie dans le cas de l'ouverture d'un seul côté des portes ;
- Aucun usager n'évacue par la station CHL pour ne pas passer devant l'incendie en évacuant ;
- Les services de secours peuvent intervenir sans difficulté depuis tous les accès (tête CHL, issue de secours ou tête WUN).

### 5.2 Synthèse du scénario 2

Ce scénario d'incendie de puissance de 1 MW permet d'évaluer les conditions d'évacuation face à un incendie en milieu de rame entre la station CHL et l'issue de secours.

Les usagers se dirigeant vers l'issue ou la tête CHL peuvent évacuer dans de bonnes conditions, sans être significativement impactés par les fumées (hormis quelques légères retombées de fumées sur 25 m, éparées, pouvant ralentir l'évacuation via l'issue de secours).

En complément :

- Le rayonnement thermique dépasse la valeur seuil de 2 kW/m<sup>2</sup> au niveau de l'incendie. Aucun usager n'est confronté à ces conditions extrêmes lors de l'évacuation ;
- Aucun usager n'est soumis à des niveaux de température, concentration en CO ou rayonnement potentiellement létaux ;
- Le dernier usager du tramway évacuant vers la tête CHL est hors de danger environ 6 min après le début de l'incendie dans le cas de l'ouverture des deux côtés des portes, et 8 min après le début de l'incendie dans le cas de l'ouverture d'un seul côté des portes ;
- Le dernier usager du tramway évacuant vers l'issue est hors de danger environ 6 min après le début de l'incendie dans le cas de l'ouverture des deux côtés des portes, et 8 min après le début de l'incendie dans le cas de l'ouverture d'un seul côté des portes ;
- Les services de secours peuvent intervenir sans difficulté depuis tous les accès (tête CHL, issue de secours ou tête WUN).

### 5.3 Synthèse du scénario 3

Ce scénario d'incendie de puissance de 1 MW permet d'évaluer les conditions d'évacuation face à un incendie en milieu de rame entre la station WUN et l'issue de secours.

Les usagers se dirigeant vers l'issue ou la tête WUN peuvent évacuer dans de bonnes conditions, sans être significativement impactés par les fumées (hormis quelques légères retombées de fumées sur 25 m, éparses, pouvant ralentir l'évacuation via l'issue de secours).

En complément :

- Le rayonnement thermique dépasse la valeur seuil de 2 kW/m<sup>2</sup> au niveau de l'incendie. Aucun usager n'est confronté à ces conditions extrêmes lors de l'évacuation ;
- Aucun usager n'est soumis à des niveaux de température, concentration en CO ou rayonnement potentiellement létaux ;
- Le dernier usager du tramway évacuant vers la tête WUN est hors de danger environ 7 min après le début de l'incendie dans le cas de l'ouverture des deux côtés des portes, et 9 min après le début de l'incendie dans le cas de l'ouverture d'un seul côté des portes ;
- Le dernier usager du tramway évacuant vers l'issue est hors de danger environ 7 min 30 s après le début de l'incendie dans le cas de l'ouverture des deux côtés des portes, et 9 min après le début de l'incendie dans le cas de l'ouverture d'un seul côté des portes ;
- Les services de secours peuvent intervenir sans difficulté depuis tous les accès (tête CHL, issue de secours ou tête WUN).

### 5.4 Synthèse du scénario 4

Ce scénario d'incendie de puissance de 1 MW permet d'évaluer les conditions d'évacuation face à un incendie en début de rame entre la station WUN et l'issue de secours.

Les usagers se dirigeant vers l'issue peuvent évacuer dans de bonnes conditions, sans être significativement impactés par les fumées (hormis quelques légères retombées de fumées sur 25 m, éparses, pouvant ralentir l'évacuation via l'issue de secours).

En complément :

- Le rayonnement thermique dépasse la valeur seuil de 2 kW/m<sup>2</sup> au niveau de l'incendie. Aucun usager n'est confronté à ces conditions extrêmes lors de l'évacuation ;
- Aucun usager n'est soumis à des niveaux de température, concentration en CO ou rayonnement potentiellement létaux ;
- Le dernier usager du tramway évacuant vers l'issue est hors de danger environ 9 min 30 s après le début de l'incendie dans le cas de l'ouverture des deux côtés des portes, et 13 min après le début de l'incendie dans le cas de l'ouverture d'un seul côté des portes ;
- Aucun usager n'évacue par la station WUN pour ne pas passer devant l'incendie en évacuant ;
- Les services de secours peuvent intervenir sans difficulté depuis tous les accès (tête CHL, issue de secours ou tête WUN).

## 5.5 Synthèse du scénario 5

Ce scénario d'incendie de puissance de 10 MW permet d'évaluer les conditions d'évacuation face à un incendie sur toute la rame entre la station CHL et l'issue de secours.

Les usagers se dirigeant vers la tête CHL peuvent évacuer dans de bonnes conditions, sans être impactés par les fumées. Les usagers évacuant vers l'issue de secours rencontrent des fumées opaques à hauteur d'Homme, ce qui ralentit leur évacuation.

En complément :

- Le rayonnement thermique dépasse la valeur seuil de 2 kW/m<sup>2</sup> au niveau de l'incendie. Aucun usager n'est confronté à ces conditions extrêmes lors de l'évacuation ;
- Aucun usager n'est soumis à des niveaux de température, concentration en CO ou rayonnement potentiellement létaux ;
- Le dernier usager du tramway évacuant vers la tête CHL est hors de danger environ 6 après le début de l'incendie dans le cas de l'ouverture des deux côtés des portes, et 8 min après le début de l'incendie dans le cas de l'ouverture d'un seul côté des portes ;
- Le dernier usager du tramway évacuant vers l'issue est hors de danger environ 9 min après le début de l'incendie dans le cas de l'ouverture des deux côtés des portes, et 12 min après le début de l'incendie dans le cas de l'ouverture d'un seul côté des portes ;
- Les services de secours peuvent intervenir sans difficulté depuis la tête CHL. Pour intervenir par l'issue de secours ou la tête WUN, le désenfumage devra être mis en route afin d'évacuer les fumées opaques présentes dans le tunnel.

## 5.6 Synthèse du scénario 6

Ce scénario d'incendie de puissance de 10 MW permet d'évaluer les conditions d'évacuation face à un incendie en sur toute la rame entre la station WUN et l'issue de secours.

Les usagers se dirigeant vers la tête WUN peuvent évacuer dans de bonnes conditions, sans être impactés par les fumées. Les usagers évacuant vers l'issue de secours rencontrent des fumées opaques à hauteur d'Homme, ce qui ralentit leur évacuation.

En complément :

- Les derniers usagers évacuant vers l'issue de secours dans le cas de l'ouverture des portes d'un seul côté, rencontrent des conditions de température létales ;
- Le rayonnement thermique dépasse la valeur seuil de 2 kW/m<sup>2</sup> au niveau de l'incendie. Aucun usager n'est confronté à ces conditions extrêmes lors de l'évacuation ;
- Aucun usager n'est soumis à des niveaux de concentration en CO ou rayonnement potentiellement létaux ;
- Le dernier usager du tramway évacuant vers la tête WUN est hors de danger environ 7 min 30 après le début de l'incendie dans le cas de l'ouverture des deux côtés des portes, et 9 min 30 s après le début de l'incendie dans le cas de l'ouverture d'un seul côté des portes ;
- Le dernier usager du tramway évacuant vers l'issue est hors de danger environ 10 min après le début de l'incendie dans le cas de l'ouverture des deux côtés des portes ;
- Les services de secours peuvent intervenir sans difficulté depuis la tête WUN. Pour intervenir par l'issue de secours ou la tête CHL, le désenfumage devra être mis en route afin d'évacuer les fumées opaques présentes dans le tunnel.

## 6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATION

### 6.1 Conclusions des scénarios

Les scénarios étudiés ont pour objectif d'évaluer l'efficacité globale des dispositions de sécurité du tunnel.

La présence d'un incendie en tunnel est très peu probable du fait des consignes données au conducteur de sortir du tunnel en cas d'incident, et du très faible temps de parcours dans le tunnel (63 s). L'incendie probable sur un tramway est un incendie de 1 MW, équivalent à l'incendie d'une intercirculation de la rame. Une étude est tout de même réalisée, comme sensibilité à un incendie de 10 MW, pour observer les conditions d'évacuation des usagers dans le cas très défavorable et peu probable, d'un incendie d'une rame complète, en tunnel.

Les temps d'évacuation sont compris entre 4 min et 13 min, selon la position et la puissance de l'incendie, ainsi que le chemin choisi par l'utilisateur. Ces temps d'évacuation sont largement diminués dans le cas d'une ouverture des portes des deux côtés de la rame.

Le système de désenfumage n'est pas mis en marche en phase d'évacuation pour maintenir au maximum la stratification des fumées, mais peut être utilisé pour faciliter l'accès à l'incendie des services de secours.

### 6.2 Recommandation

Les recommandations et pistes d'amélioration issues de l'analyse des scénarios de développement incendie sont abordées ci-dessous :

- Consignes relatives à l'évacuation des usagers :  
Au vu des résultats des scénarios des incendies de 10 MW (très peu probables au niveau de la puissance d'incendie et d'arrêt de la rame dans le tunnel avec un parcours en tunnel d'environ 63 s), et pour s'affranchir de tout risque d'exposition d'usagers à des températures supérieures à 120°C, il convient d'ouvrir les portes des deux côtés de la rame. Au-delà de l'avantage au niveau des conditions d'évacuation des usagers, l'ouverture des portes des deux côtés permet, en moyenne, de réduire les temps d'évacuation de 2 à 3 min.

## 7 ANNEXES

Planches de résultats des scénarios 3D :

- Planche SC1
- Planche SC2
- Planche SC3
- Planche SC4
- Planche SC5
- Planche SC6