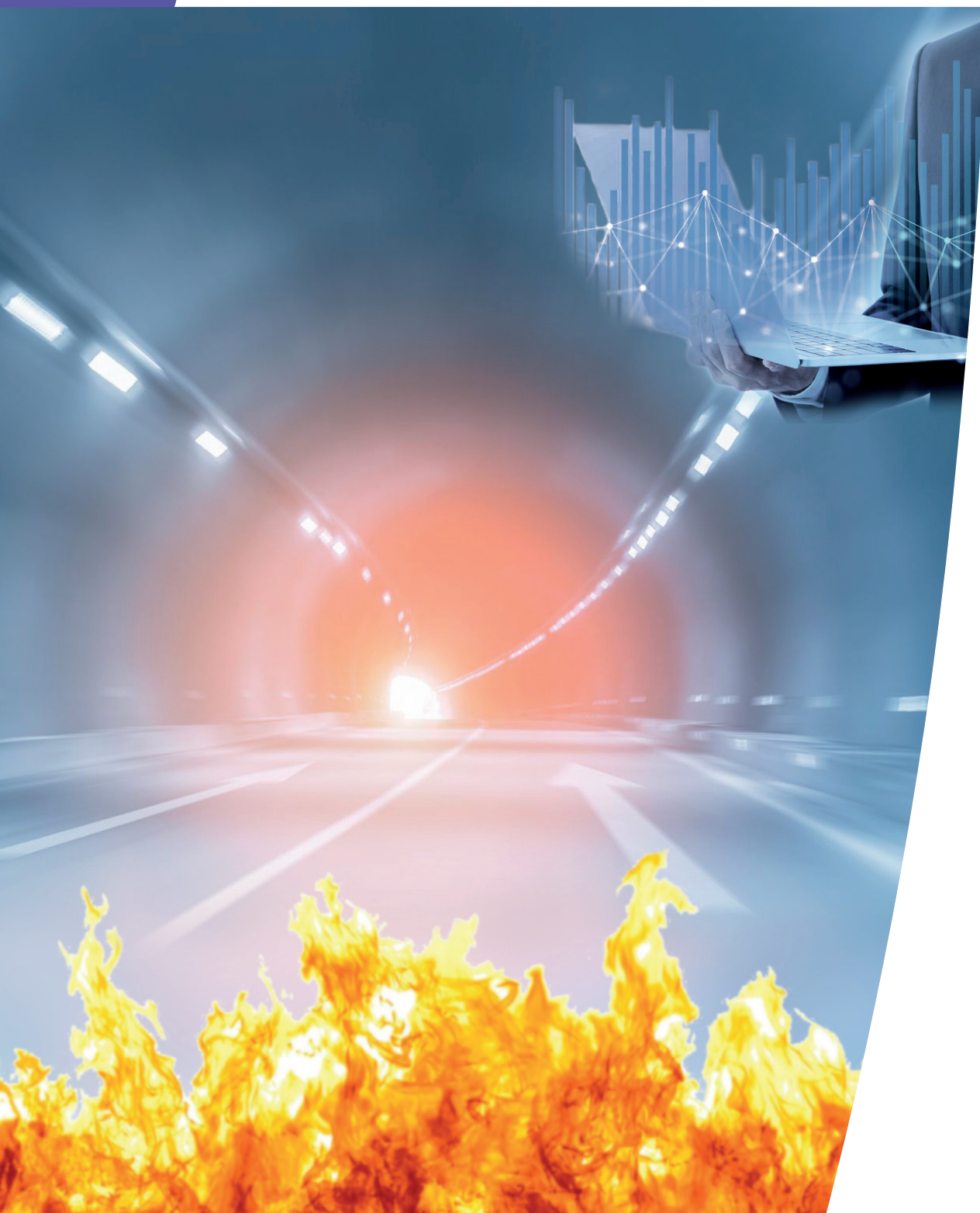


# ÉTUDE SPÉCIFIQUE DES DANGERS (ESD)

*Compléments au fascicule 4  
du guide des dossiers de sécurité*



## AVERTISSEMENT

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

# ÉTUDE SPÉCIFIQUE DES DANGERS (ESD)

*Compléments au fascicule 4  
du guide des dossiers de sécurité*

**septembre 2023**

## **Centre d'Études des Tunnels**

25, avenue François Mitterrand

69500 BRON – France

Tél. 33 (0)4 72 14 34 00

Fax. 33 (0)4 72 14 34 30

[cetu@developpement-durable.gouv.fr](mailto:cetu@developpement-durable.gouv.fr)

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

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1 INTRODUCTION</b>	<b>5</b>
<b>2 GÉNÉRALITÉS</b>	<b>6</b>
2.1 Les objectifs de l'ESD	6
2.2 La place de l'ESD dans l'élaboration des dispositions de sécurité	6
2.2.1 Au stade du projet d'ouvrage d'art, voire des études préliminaires et d'avant-projet	6
2.2.2 Au stade de l'actualisation	7
2.3 Les étapes principales d'une étude spécifique des dangers	7
<b>3 DESCRIPTION FONCTIONNELLE DU TUNNEL</b>	<b>8</b>
<b>4 IDENTIFICATION DES DANGERS ET CHOIX DES SCÉNARIOS</b>	<b>9</b>
4.1 Choix des événements déclenchants : l'usage de la matrice gravité-occurrence	9
4.1.1 Construction de la matrice	9
4.1.2 Finalité de la matrice	10
4.2 Choix des scénarios	10
4.2.1 Principes généraux	10
4.2.2 Recommandations particulières	11
<b>5 L'ANALYSE DES SCÉNARIOS</b>	<b>12</b>
5.1 Hypothèses relatives au déplacement des personnes	12
5.1.1 Nombre de personnes exposées au danger	12
5.1.2 Cinétique de l'évacuation des personnes	12
5.1.3 Perte de la capacité d'auto-évacuation	14
5.1.4 Applicabilité des éléments les plus avancés de l'état de l'art	15
5.1.5 Les zones de danger : une approche non recommandée	15
5.2 Modélisation de l'incendie : hypothèses	16
5.2.1 Courbes de référence pour les feux de bus	16
5.2.2 Articulation des simulations 1D et 3D	16
5.2.3 Géométrie du foyer	16
5.2.4 Spécification des termes sources de CO et suies dans les modèles 3D	16
5.3 La construction des graphiques supports de l'analyse	17
5.3.1 Choix des valeurs transversales et altimétriques de la modélisation 3D	17
5.3.2 Illustration du déplacement des usagers	18
5.3.3 Articulation entre les différentes illustrations	18
5.4 Les principes de l'analyse	18
5.4.1 Spatialisation, temporalisation et quantification de l'analyse	18
5.4.2 Récapitulatif concernant la perte d'auto-évacuation	18
5.4.3 Études de sensibilité	19
5.4.4 Une analyse par scénario à relativiser	19
5.4.5 Synthèse de l'ensemble des scénarios	19
<b>6 LA CONCLUSION DE L'ESD</b>	<b>20</b>
<b>7 ANNEXE : SYNTHÈSE DES PARAMÈTRES D'ÉVACUATION</b>	<b>21</b>
<b>8 ANNEXE : APPROCHE CETU-INERIS ISSUE DE L'ÉTAT DE L'ART : PRÉSENTATION SUCCINCTE</b>	<b>22</b>
<b>9 BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>23</b>

# INTRODUCTION

Le fascicule 4 du guide des dossiers de sécurité (cf. [1]) présente le rôle de l'étude spécifique des dangers (ESD) dans le dossier de sécurité, et explique son contenu ainsi que sa méthodologie d'élaboration. Il a été publié en 2003 et est appliqué depuis lors.

Le CETU est amené à analyser annuellement un certain nombre d'ESD dans le cadre de ses missions d'expertise ou d'assistance à maîtrise d'ouvrage. Il échange régulièrement, à leur propos, avec les bureaux d'études spécialisés et les experts de la Commission Nationale d'Evaluation de la Sécurité des Ouvrages Routiers (CNESOR).

Ce retour d'expérience a conduit le CETU à proposer des améliorations des pratiques dont il a ensuite discuté avec les bureaux d'études et les experts. Ce document est la formalisation de ce travail. Il a pour objectif de préciser et compléter les informations du fascicule 4 (cf. [1]) pour harmoniser et améliorer la mise en œuvre des ESD, et en particulier contribuer à mieux définir les hypothèses prises dans ces études.

Un premier chapitre présente les éléments généraux nécessaires à la bonne intégration de l'ESD dans la gestion de la sécurité. Les chapitres suivants traitent des étapes méthodologiques pour lesquelles des précisions et compléments sont introduits.

# GÉNÉRALITÉS

Ce chapitre présente les objectifs de l'ESD, sa place dans les différentes dispositions de sécurité et les étapes principales pour son élaboration.

## 2.1 LES OBJECTIFS DE L'ESD

Selon l'arrêté du 18 avril 2017 (cf. [2]), l'ESD précise et justifie les mesures destinées à assurer la sécurité des personnes en fonction des accidents susceptibles de survenir dans l'ouvrage, depuis l'événement déclenchant jusqu'à la prise en charge des usagers.

En conséquence, elle a pour **objectif principal d'identifier les dangers auxquels est soumis le système « tunnel », d'analyser la manière dont il y fait face, et, si nécessaire, de l'améliorer en traitant les faiblesses identifiées.**

L'ESD permet aussi d'**évaluer le niveau de sécurité de l'ouvrage** en concertation **avec les parties prenantes**. À ce titre, l'ESD doit tout particulièrement examiner les éventuelles différences par rapport au référentiel constitué par l'instruction technique ([3]), leurs impacts, et les dispositions destinées à les compenser. Dans une logique GAME<sup>1</sup>, l'**ESD vérifie** alors si le **niveau de sécurité atteint** avec les mesures compensatoires est **globalement au moins équivalent** à ce qu'il serait si l'ouvrage

respectait les prescriptions de l'**instruction technique**. Cette vérification est faite principalement à **dire d'expert** sur la base des analyses et résultats de l'étude.

L'ESD constitue également un **outil pédagogique puissant**. En effet, d'une part elle permet de comprendre et étayer les dispositions techniques ou d'exploitation prévues dans l'ouvrage ; d'autre part, elle identifie et justifie la nécessité éventuelle de les améliorer ou de les compléter. Elle peut en outre contribuer au choix du scénario des premiers exercices, notamment pour les tunnels neufs ou fortement modifiés (le retour d'expérience disponible peut ne plus être adapté).

En outre, les résultats d'une ESD constituent des éléments utiles à l'établissement :

- des consignes d'exploitation ;
- du plan d'intervention et de sécurité (PIS) ;
- des plans d'intervention des services publics de secours.

## 2.2 LA PLACE DE L'ESD DANS L'ÉLABORATION DES DISPOSITIONS DE SÉCURITÉ

L'ESD intervient à **différents stades des études** qui permettent de **définir, stabiliser ou actualiser les éléments concourant à la sécurité de l'ouvrage**. Deux cas de figures principaux peuvent être distingués : d'une part les tunnels neufs ou à rénover<sup>2</sup> pour lesquels le dossier de sécurité est à constituer, d'autre part, les ouvrages en exploitation disposant d'un dossier de sécurité à actualiser. Quel que soit le cas de figure, l'ESD est une pièce maîtresse du dossier de sécurité et a les mêmes objectifs rappelés au 2.1.

### 2.2.1 Au stade du projet d'ouvrage d'art, voire des études préliminaires et d'avant-projet

Dans plusieurs phases de l'étude d'un tunnel nouveau ou à rénover, l'ESD peut aider, éventuellement de façon itérative, à définir et améliorer l'état de référence technique et organisationnel projeté pour l'ouvrage<sup>3</sup>.

1. Globalement Au Moins Equivalent à.

2. Dans ce premier cas, la conception des tunnels neufs est uniquement contrainte par l'environnement au sens large (géologique, naturel, urbanistique, etc.) alors que s'ajoutent les contraintes d'une structure pré-existante pour les ouvrages à rénover.

3. Cet état de référence est l'état projeté pour l'ouverture à la circulation.

Le chapitre A.2 du fascicule 4 (cf. [1]) indique comment elle peut apporter cette contribution **au stade du projet d'ouvrage d'art (POA)** puis **au stade de l'ouverture à la circulation**. Pour ces deux étapes, l'ESD opère respectivement dans le cadre du dossier préliminaire de sécurité et dans le cadre du dossier de sécurité dont elle est une des pièces. Des **éléments de méthode de l'ESD** peuvent aussi être utilisés pour aider aux choix des dispositions techniques et organisationnelles lors des études préliminaires ou d'avant-projet, voire des premières réflexions liées au POA. Par exemple, elle peut aider à discriminer différents types de ventilation possibles, ou encore à comparer une alternative consistant à diminuer l'interdistance normalement recommandée entre issues de secours. Quelques scénarios judicieusement choisis et analysés selon la méthodologie des ESD peuvent alors nourrir la réflexion.

## 2.2.2 Au stade de l'actualisation

Dans le cas d'un tunnel en exploitation disposant d'un dossier de sécurité, l'autorisation de mise en service doit être renouvelée tous les 6 ans. Le maître d'ouvrage doit alors solliciter le préfet en remettant un dossier de sécurité actualisé. La note d'information n°21 du CETU (cf. [4]) donne les dispositions générales de cette actualisation. Il y est notamment indiqué que **les pièces destinées à démontrer le niveau de sécurité, ne sont à actualiser que s'il y a lieu**. Des précisions sont apportées ci-après concernant l'ESD.

L'**étude de trafic** du dossier de sécurité fournit des données d'entrée importantes. Si cette pièce n'est pas systématiquement actualisée, elle doit, par contre, être **systématiquement vérifiée**. Pour ce faire, des données récentes de trafic sont utilisées ainsi que des comptages sur le terrain lorsqu'il y a lieu (pour les TMD notamment, cf. [5]). En fonction des écarts constatés entre ces informations et celles utilisées antérieurement pour l'étude de trafic, on décide d'actualiser ou non cette étude de trafic. Ces **écarts** peuvent également être une **raison d'actualiser l'ESD**, par exemple si l'accroissement du trafic change la classe de fréquence des événements déclencheurs ou augmente significativement le nombre d'usagers exposés au danger. Le type de véhicules autorisés et le phénomène de congestion doivent également être des points d'attention tout particuliers, une évolution significative pouvant aussi conduire à actualiser l'ESD.

D'autres éléments sont **susceptibles de rendre cette actualisation nécessaire**, comme le **retour d'expérience** sur incident ou **l'évolution d'éléments contextuels** (par exemple liés à l'environnement aux têtes) qui peuvent notamment requérir l'étude de nouveaux dangers et/ou scénarios.

En tout état de cause, la **non-nécessité d'actualiser une ESD** doit être **justifiée** dans une **note spécifique intégrée au dossier de sécurité**. Cette justification doit notamment reposer sur l'évolution du trafic, des conditions d'exploitation, de l'environnement urbain ainsi que du retour d'expérience.

## 2.3 LES ÉTAPES PRINCIPALES D'UNE ÉTUDE SPÉCIFIQUE DES DANGERS

L'étude spécifique des dangers commence par rappeler de façon **synthétique l'état de référence de l'ouvrage** en présentant le tunnel et son environnement. Comme indiqué dans le fascicule 4 (cf. [1]), il ne doit pas y avoir d'ambiguïté sur l'état de référence pris en compte. Il est celui sur la base duquel est établie l'appréciation du niveau de sécurité.

Une **description fonctionnelle** de l'ouvrage est ensuite réalisée. Elle explicite les fonctions de sécurité assurées et indique comment les dispositions techniques et d'exploitation y concourent.

L'étape suivante commence par **l'identification des dangers**. De multiples méthodes peuvent être utilisées à cette fin. Le fascicule 4 propose de raisonner à l'aide d'une liste guide des événements dangereux en tunnel, ce qui semble bien adapté à ce type d'études et a fait ses preuves. Un petit nombre de **scénarios** est ensuite **choisi** en sélectionnant les événements

déclenchants liés au danger puis en les contextualisant (localisation dans l'ouvrage, conditions de trafic, etc.).

Le **déroulement** de chaque **scénario** est ensuite **décrit et illustré dans l'espace et le temps**, puis il est **analysé**. Le déplacement des usagers et l'évolution des phénomènes physiques susceptibles de les affecter sont notamment pris en compte, de même que la mise en œuvre des dispositions techniques et organisationnelles.

L'ESD se termine par une conclusion qui rappelle de façon synthétique le contenu et les enseignements des différentes étapes de la méthode ainsi que les principaux résultats. Il est notamment mis en exergue le rôle et l'impact des dispositions concourant à la sécurité ainsi que les améliorations ou compléments nécessaires. Cette conclusion récapitule aussi les éléments utiles à l'exploitation.

## DESCRIPTION FONCTIONNELLE DU TUNNEL

La description fonctionnelle est une étape incontournable de l'étude spécifique des dangers. Elle permet de **mettre en exergue le lien entre les moyens techniques ou d'exploitation d'une part et les fonctions de sécurité d'autre part**. Elle concourt aussi à définir la façon dont l'action des différents moyens sera prise en compte dans les scénarios.

**La note d'information n°23** (cf. [6]) a vocation à **alimenter ce travail**. Elle comporte en effet une définition des fonctions de sécurité et des moyens qui y concourent ainsi qu'un tableau général permettant d'associer les premières aux deuxièmes. La description fonctionnelle propre à chaque ouvrage doit être basée sur ces éléments généraux.

Dans beaucoup d'études spécifiques des dangers, la description fonctionnelle repose sur des tableaux où les liens entre moyens et fonctions sont systématiquement expliqués

à l'aide de phrases. Cette formalisation a l'avantage de lever toute ambiguïté. Toutefois, elle peut conduire à répéter des trivialités telles que « l'éclairage de sécurité éclaire le cheminement des usagers lors de leur évacuation et de leur mise en sécurité », et donc conférer une certaine lourdeur à la description. Les liens les plus importants, ou délicats à expliciter, entre moyens et fonctions peuvent ainsi ne pas être mis en exergue et leur architecture globale ne pas apparaître clairement.

Il est ainsi **utile de recourir à d'autres types d'illustrations**, à l'aide de **graphiques, logigrammes, ou tableaux du type** de celui<sup>4</sup> présenté dans la **note d'information n°23**. Ces types d'illustration ont vocation à compléter voire remplacer les tableaux détaillés usuellement proposés. Des commentaires explicitant les points les plus complexes peuvent éventuellement accompagner ces représentations.

---

4. Dans le tableau de la note 23, un symbole illustre l'articulation entre fonctions et équipements.



# IDENTIFICATION DES DANGERS ET CHOIX DES SCÉNARIOS

Le fascicule 4 (cf. [1]) recommande de procéder en trois étapes : l'identification des dangers, le choix des événements déclenchants, et le choix des scénarios. Suivre ces trois étapes sans les amalgamer partiellement ou totalement, permet de limiter le risque d'erreur manifeste même s'il n'existe pas un seul ensemble de scénarios valable.

Des précisions et compléments sont apportés ci-après concernant d'une part l'utilisation éventuelle de la matrice gravité-occurrence dans le choix des événements déclenchants et d'autre part le choix des scénarios.

## 4.1

## CHOIX DES ÉVÉNEMENTS DÉCLENCHANTS : L'USAGE DE LA MATRICE GRAVITÉ-OCCURRENCE

Le chapitre B.2 du fascicule 4 (cf. [1]) évoque la possibilité d'utiliser une **matrice gravité-occurrence afin de fonder le choix des événements déclenchants sur des éléments quantitatifs** (quelques éléments standardisés sont fournis à cette fin dans le fascicule). Des précisions sont apportées ci-après concernant la construction de la matrice et sa finalité.

### 4.1.1 Construction de la matrice

Cette matrice est construite à partir des classes de gravité et de fréquences comme représenté dans la figure 1.

Le **positionnement** des événements déclenchants sur **l'échelle de la gravité** est **effectué à dire d'expert** à ce stade, ce qui est adapté à une approche par classe. Il **repose sur le retour d'expérience** des événements de ce type à l'échelle nationale, voire internationale. Leur **positionnement** sur **l'échelle de la fréquence** repose pour sa part sur **des taux de survenance locaux<sup>5</sup>** lorsque le nombre de données utilisables pour les calculer ainsi que la **période temporelle** qu'elles couvrent sont **statistiquement significatifs**. Dans le cas contraire des **taux de survenance nationaux** sont **utilisés**.

	I Mineur ou nul	II Significatif	III Critique	IV Catastrophique	V Catastrophe Majeure
A Très fréquent					
B Fréquent					
C Occasionnel					
D Rare					
E Très rare					
F Extrêmement rare					

Figure 1: Matrice fréquence gravité.

5. Les taux de survenance d'événements sont généralement exprimés en nombre d'événements pour  $10^8 \times \text{véh} \times \text{km}$ .

Le fascicule 4 (cf. [1]) indique que les **dénominations utilisées (très fréquent, fréquent, etc.)** renvoient à une **hiérarchie propre à la famille des événements en tunnel, et non à une échelle absolue**. Sur l'échelle de la fréquence, les événements déclenchants sont ainsi positionnés relativement, les uns vis-à-vis des autres.

Des valeurs de fréquence peuvent être employées pour étayer ce positionnement relatif, mais l'utilisation de la notion de « **temps de retour** » est **à éviter car très trompeuse pour les parties prenantes**. Par exemple, si la fréquence annuelle estimée d'un incident est  $10^{-3}$ , il est préférable de ne pas écrire que cet incident a un temps de retour d'un millier d'années. En premier lieu, introduire dans l'analyse des échelles de temps supérieures à la centaine d'années n'a pas beaucoup de sens eu égard au cycle de vie de l'ouvrage. Mais surtout, cette façon de traduire la fréquence estimée peut donner l'impression que l'incident ne se produira pas avant très longtemps alors qu'il peut survenir à très court terme, même si la probabilité que cela arrive est faible.

Enfin, à la différence de ce qui se fait dans d'autres domaines de l'analyse des risques, il n'est **pas opportun de définir des zones acceptables ou inacceptables dans la matrice**. **L'acceptabilité est estimée d'après les résultats de l'ESD et prend en compte les spécificités de chaque ouvrage**. Elle est discutée entre le maître d'ouvrage et ses prestataires d'une part et les parties prenantes d'autre part dans le cadre de l'examen du dossier de sécurité.

## 4.1.2 Finalité de la matrice

Eu égard à la façon dont la matrice est construite (cf. 4.1.1), celle-ci est **bien adaptée pour aider au choix des événements déclenchants**. Conformément au propos du fascicule 4 (cf. [1]), elle doit être utilisée uniquement à cette fin.

**Cette dernière remarque mérite explication**. En effet, la matrice a déjà été employée abusivement dans le but de montrer comment l'ensemble des dispositions de sécurité d'un tunnel modifie la fréquence et la gravité des événements déclenchants. Les événements déclenchants avaient alors été positionnés dans la matrice avant analyse des scénarios, puis repositionnés après cette analyse, le déplacement étant mis en évidence graphiquement. Or, chaque scénario n'est qu'une contextualisation très particulière d'un événement déclenchant et seul un petit nombre de scénarios est étudié. Ces scénarios ne peuvent donc, à eux seuls, étayer un déplacement dans la matrice de criticité des événements déclenchants dont la position initiale a été définie à partir de données générales (cf. 4.1.1).

Une variante a également déjà été observée où ce sont les scénarios et non les événements déclenchants qui sont positionnés dans la matrice après analyse. Si cette représentation pose moins de problème de fond, elle entretient toutefois la confusion pour le lecteur non expert, l'incitant à penser qu'elle suffit à qualifier le niveau de sécurité du système. Elle est donc également à éviter.

## 4.2 CHOIX DES SCÉNARIOS

Les principes généraux devant guider le choix des scénarios seront d'abord présentés. Quelques recommandations spécifiques seront ensuite abordées.

### 4.2.1 Principes généraux

En cohérence avec les objectifs généraux de l'ESD rappelés au chapitre 2.1, les scénarios doivent permettre à la fois de comprendre comment le système réagit face au danger et d'évaluer le niveau de sécurité.

Seul un **petit échantillon** d'entre eux est sélectionné de manière à pouvoir en **mener une analyse approfondie**, inenvisageable s'ils sont trop nombreux. En conséquence, le **nombre de scénarios est généralement compris entre 4 et 8** et les études de sensibilité<sup>6</sup> ne sont pas systématiques. Les scénarios doivent donc être judicieusement choisis et ce **choix dûment justifié**.

Pour guider ce choix, il est d'abord utile de rappeler la définition du fascicule 4 (cf. [1]) « un scénario est le déroulement d'une situation

initiée par un événement déclenchant placé dans son contexte et intégrant donc, le cas échéant, des éléments aggravants. »

Le **choix des scénarios est donc basé sur les événements déclenchants précédemment sélectionnés, en y ajoutant des éléments de contexte**. Par exemple, l'événement déclenchant « incendie de PL » servira de base au scénario « incendie de 30 MW, à 300 m de la tête nord, en situation de trafic congestionné, avec contre-pression de 20 Pa générant un courant d'air vers la tête nord. »

Ce travail doit permettre que **l'ensemble des scénarios** :

- soit **représentatif du plus grand nombre de situations possibles** ;
- soit **porteur d'enseignements** ;
- présente :
  - un **bon équilibre en termes de probabilité de survenance et de gravité**,
  - un **bon équilibre entre les situations que le système sait facilement gérer, celles qui permettent de mettre particulièrement en exergue l'impact des dispositions prises, et celles qui poussent le système à ses limites**<sup>7</sup>.

6. La notion d'étude de sensibilité est abordée au chapitre 3.4 du fascicule 4 ([1]).

7. Dans le chapitre 7.4 de son rapport d'activité 2013-2017 (cf. [7]), la CNESOR rappelle qu'elle a conseillé, dans certains cas, de ne pas retenir que des scénarios trop pessimistes.

## 4.2.2 Recommandations particulières

### Le choix ne doit pas viser l'évaluation de dispositions particulières du système

Dans la mesure où il ne peut y avoir qu'un nombre réduit de scénarios approfondis, les choisir spécifiquement pour évaluer certaines dispositions particulières du système conduit à se concentrer sur certains aspects au détriment de l'ensemble du système. De plus, cela pourrait conduire à des conclusions trompeuses, y compris dans l'appréciation de ces dispositions particulières, le nombre de scénarios dédiés étant de toute façon trop réduit (souvent un seul) pour isoler correctement leur impact vis-à-vis de l'action d'autres mesures.

Les enseignements relatifs à l'impact sur la sécurité d'une disposition du système doivent découler de l'analyse des scénarios choisis à l'échelle du système et confortés par des études de sensibilité sur ces scénarios. Ces enseignements ne doivent pas être spécifiquement recherchés via le choix de scénarios particuliers.

### Les hypothèses de trafic

Les **conditions de trafic dans les scénarios** peuvent être définies de différentes manières. Il est important qu'elles soient justifiées et que les choix effectués soient cohérents avec les principes généraux rappelés au chapitre 4.2.1. Ces hypothèses s'appuient sur les prévisions de l'étude de trafic du dossier de sécurité, dix ans après la mise en service de l'ouvrage ou après la date de renouvellement de l'autorisation de mise en service.

**Quelle que soit l'approche retenue**, un certain nombre de constantes doivent néanmoins demeurer. Tout d'abord, des **trafics horaires** sont systématiquement utilisés. Ensuite, les valeurs sont à établir dans l'étude de trafic par **type de véhicules**<sup>8</sup>. Il est opportun de maintenir cette distinction des types de véhicules dans le choix des scénarios et d'éviter de raisonner en unités de véhicule particulier (UVP). Cela permet

par exemple de mieux caractériser la nature des véhicules susceptibles d'être impliqués dans un événement (notamment présent dans la file de véhicules), ce qui est utile pour l'analyse des scénarios.

Ci-après, sont donnés **quelques exemples d'approches différentes pour définir ces conditions de trafic**. Une première possibilité est d'établir ces conditions à partir de la notion d'heures la plus chargée d'une période donnée (généralement l'année projetée) par exemple le trafic de la trentième heure la plus chargée ou de la centième heure la plus chargée. Une deuxième possibilité est d'utiliser des moyennes horaires caractéristiques définies sur une période donnée (généralement l'année projetée) par exemple, la moyenne des trafics horaires de pointe, la moyenne des trafics horaires de la période creuse ou la moyenne des trafics horaires « de nuit ». D'autres types d'approches sont possibles à partir de la notion de trafic médian (50 %) sur une année ou en utilisant des pondérations de trafic d'un type de véhicules par celle d'un autre type de véhicules (par exemple pour viser les trafics horaires VL les plus importants lorsque l'incendie de PL est le plus probable). Il faut toutefois garder à l'esprit que **le trafic n'est qu'un paramètre à faire varier parmi d'autres**. Le **faible nombre de scénarios ne permet pas** de considérer des **cas de figure trop nombreux ou trop raffinés** qui risquent souvent de s'avérer superfétatoires vis-à-vis des enjeux de sécurité du tunnel et des incertitudes introduites par ailleurs (par exemple venant des modélisations). Généralement, **au maximum deux cas de figure** sont pris en compte pour le trafic.

La **prise en compte ou non d'un bus** dans l'un ou l'autre des scénarios **doit être justifiée** par exemple par la présence de lignes régulières de bus (urbaines ou interurbaines) ou d'un nombre significatif d'autocars de tourisme empruntant ou susceptibles d'emprunter l'ouvrage. Sauf cas particulier argumenté, il n'y a pas lieu de retenir ce type de scénarios si le trafic de bus est extrêmement négligeable en volume. Si ce trafic n'est pas négligeable les bus seront pris en compte au titre d'une étude de sensibilité d'un ou plusieurs scénarios de base (sans bus). Le choix des scénarios à utiliser se fera en fonction du volume de bus observés ou escomptés.

8. Cette distinction permet de caractériser la fréquence des événements déclenchants (par exemple incendie de PL) et donc d'aider à les choisir (cf. 4.1.1).

# L'ANALYSE DES SCÉNARIOS

La **première étape** de l'analyse des scénarios consiste à choisir les **hypothèses relatives au déplacement des personnes** d'une part et à la **modélisation de l'incendie** d'autre part. Ces hypothèses sont notamment nécessaires pour construire les graphiques « espace-temps » supports de l'analyse.

La **durée des scénarios** est comprise entre **20 et 30 min**. La valeur choisie dépend du **délai d'arrivée des services de secours et des enseignements potentiels** que l'analyse peut apporter. Par exemple, trente minutes peut être une durée utile pour prendre en compte, dans l'analyse, l'impact sur les usagers d'un phénomène de *backlayering* tardif.

## 5.1 HYPOTHÈSES RELATIVES AU DÉPLACEMENT DES PERSONNES

Le premier chapitre indique les conditions à partir desquelles l'auto-évacuation d'un usager n'est plus possible. Le second chapitre apporte un certain nombre de précisions aux recommandations du fascicule 4 (cf. [1]) en matière de cinétique du déplacement des personnes. Le troisième chapitre indique dans quelles conditions des éléments plus avancés de l'état de l'art peuvent être utilisés ; un exemple d'une telle approche est succinctement présenté en annexe 8. Enfin, un dernier chapitre explique pourquoi l'approche par zones de danger n'est pas recommandée.

### 5.1.1 Nombre de personnes exposées au danger

Il est d'abord nécessaire de déterminer les conditions de formation des files de véhicules arrêtés au droit d'un incendie. Cette information permettra d'en déduire le nombre d'usagers présents sur place.

En cohérence avec les **formules du fascicule 4** (cf. [1]), le **nombre de véhicules dans la file d'attente dépend** d'un certain nombre de **paramètres** parmi lesquels **l'interdistance à l'arrêt**. Cette interdistance est *a priori* celle indiquée dans le fascicule 4 (**10 m de pare-chocs avant à pare-chocs avant, soit environ 2 m entre véhicules**)<sup>9</sup>. Elle peut être supérieure si, par exemple, le conducteur s'arrête car les conditions de visibilité ne lui permettent plus de poursuivre. En cohérence avec le retour d'expérience, une **visibilité inférieure à 2 m à hauteur d'homme provoque l'arrêt du véhicule**.

Pour chaque scénario, la **quantité de véhicules et la longueur des files d'attente** doivent être **justifiées** par un **calcul détaillé** faisant apparaître les **hypothèses et formules utilisées**. Le **nombre d'usagers** en est alors déduit **en fonction du taux d'occupation de chaque véhicule**. Le fascicule 4 indique que

ce taux est de **1,5 pour les VL et les PL**. Concernant les **bus ou autocars**, il doit être **défini en cohérence avec le type de véhicules** susceptibles d'emprunter l'ouvrage : bus de ville simple ? Articulé ? Car de tourisme ? Il doit également **tenir compte de la fréquentation des usagers**, notamment à l'heure de pointe. **En cas d'information insuffisante ou non fiabilisée**, une valeur de **65 personnes par bus de ville non articulé, de 100 personnes par bus de ville articulé**<sup>10</sup> et de **80 personnes par car de tourisme sera retenue**<sup>11</sup>.

### 5.1.2 Cinétique de l'évacuation des personnes

La **cinétique de l'évacuation** des personnes **dépend principalement de la visibilité** qui influence à la fois le déclenchement du déplacement, la vitesse de marche et la trajectoire des usagers. Les chapitres ci-après apportent les précisions nécessaires sur chacun de ces sujets.

#### Visibilité

La distance de visibilité est définie dans le fascicule 4 (cf. [1]) par la formule  $d = \frac{C}{K}$  où  $K$  est le coefficient d'extinction et  $C$  est un coefficient qui dépend des conditions d'éclairage et du contraste de l'objet à voir.

#### Détermination de $K$ coefficient d'extinction

Pour déterminer  $d$ ,  $K$  doit être systématiquement calculé à 2 m de hauteur, cette valeur représentant de façon conservative les conditions au niveau de la tête d'un individu. Le fascicule 4 (cf. [1]) fournit une formule pour le calcul de  $K$ .

9. Cette hypothèse du fascicule 4 conduit à une longueur de véhicule de 8m qu'il faut comprendre comme une longueur moyenne intégrant tous les types de véhicules (VL, PL, etc.)

10. Ces deux valeurs correspondent à 60 % de la capacité maximale de ces deux types de bus.

11. À la différence des bus de ville, le nombre de voyageurs est limité au nombre de places assises et les organisateurs de transports essaient d'atteindre cette limite afin de rentabiliser le trajet.

## Détermination de C coefficient qui dépend des conditions d'éclairage et du contraste de l'objet à voir

Comme précisé par ce fascicule, la **valeur de C** est comprise **entre 2 et 6**. Elle est spécifique à chaque ouvrage. Elle dépend principalement de la visibilité des équipements guidant l'évacuation (éléments lumineux spécifiques de guidage, plots de jalonnement ou issues). En toute rigueur, ce paramètre devrait donc varier en fonction de la luminosité de ces équipements et du moment où ils deviennent perceptibles pour les usagers au cours de leur déplacement. Mais, prendre en compte cette variabilité complexifierait significativement la modélisation du déplacement humain. Cela constituerait de plus un excès de raffinement peu cohérent avec les approximations faites par ailleurs. Il est donc acceptable de déterminer la visibilité sur la base d'une **valeur de C moyenne qui reste la même dans tout le tunnel**. On pourra par exemple considérer que :

- **6** correspond à un tunnel dont les **issues** sont **espacées d'environ 100 m** et équipées de **feux-flash** ainsi que de **dispositifs dynamiques de guidage de type chevrons** (cf. [10]) ;
- **5** correspond à un tunnel dont les **issues** sont **espacées d'environ 200 m** et équipées de **feux-flash** ainsi que de **dispositifs dynamiques de guidage de type chevrons** ;
- **4** correspond à un tunnel dont les **issues** sont **espacées d'environ 400 m** et équipées de **feux-flash** ainsi que de **dispositifs dynamiques de guidage de type chevrons** ;
- **3** correspond à un tunnel dont les **issues** sont **espacées d'environ 400 m** et équipées de **feux-flash** seulement ;
- **2** correspond à un tunnel **sans issues de secours**.

**En cas d'espacement entre issues différent** de ceux présentés ci-avant, il est **possible de prendre une valeur au prorata** (par exemple 5,5 pour un espacement de 150 m). Si l'espacement entre issues n'est pas homogène dans l'ouvrage, la valeur à retenir pour déterminer le coefficient C est la plus petite.

L'exemple ci-avant n'a pas vocation à être exhaustif mais à donner des repères qui aideront à choisir la valeur du paramètre C correspondant le mieux au cas considéré. Compte tenu de l'influence très significative de cette valeur sur la distance de visibilité et, par suite, sur le déplacement des usagers, elle doit être justifiée.

### Classes de visibilité

Le fascicule 4 caractérise la visibilité par les qualificatifs « absente », « fortement gênée », et « claire ». Les distances de visibilité correspondantes sont :

- visibilité absente :  $d < 2 \text{ m}$  ;
- visibilité fortement gênée :  $2 \text{ m} \leq d < 10 \text{ m}$  ;
- visibilité claire :  $10 \text{ m} < d$ .

En condition de visibilité claire, compte tenu de la présence d'obstacles visuels (notamment pour un conducteur dans son véhicule), une distance de visibilité maximale d'environ 30 mètres paraît appropriée. Elle est cohérente avec l'état de l'art et raisonnablement majorante.

## Déclenchement du déplacement

### Prise de conscience du danger

Pour toutes les conditions ci-dessous, les distances de visibilité à prendre en compte sont celles définies précédemment.

#### Conditions générales

Une fois le véhicule arrêté, il est fait l'hypothèse que la prise de conscience du danger va déclencher le processus d'évacuation. L'expérience montre que l'usager prend **conscience du danger lorsqu'au moins une des trois conditions ci-après est remplie** :

- il est **dans le véhicule qui est derrière le véhicule incendié** (avec l'interdistance indiquée dans le fascicule 4) et **l'incendie a atteint** un stade de développement suffisant pour sembler dangereux (soit **1 MW en ordre de grandeur**) ;
- les **fumées arrivent à son niveau**, y compris si elles sont stratifiées et ont un **coefficient d'extinction K de 0,4 m<sup>-1</sup>** ;
- il **voit un autre usager en train d'évacuer**.

#### Conditions supplémentaires

associées aux dispositifs visuels et sonores

Lorsque l'ouvrage est équipé de dispositifs visuels<sup>12</sup> et sonores, des hypothèses supplémentaires peuvent être retenues :

- tous les usagers prennent conscience du danger **dès activation des dispositifs sonores** ;
- **seuls les usagers qui voient les dispositifs visuels** prennent conscience du danger dès leur activation.

Néanmoins, **des études de sensibilité doivent être conduites** pour examiner le cas où ces dispositifs seraient sans effet sur la prise de conscience du danger. En effet, le retour d'expérience montre que de telles situations ne sont pas rares.

La prise en compte d'autres dispositifs susceptibles de déclencher l'auto-évacuation est possible. Elle doit toutefois être effectuée avec prudence en s'appuyant sur l'état de l'art ou un retour d'expérience suffisamment convaincant.

### De la prise de conscience du danger vers le début du déplacement

Dans le processus d'évacuation, comme illustré dans la figure, la **prise de conscience du danger** est suivie d'une phase comprenant l'**hésitation**, la **prise de décision** et la **sortie du véhicule**. Conformément au fascicule 4, la durée de cette phase est de **90 s pour les personnes circulant en VL ou en PL**, et de **300 s pour celles présentes dans un bus**.

Concernant le **bus**, **300 s** est le délai nécessaire au **dernier usager** pour sortir. Pour le **premier usager**, ce délai est de **90 s**. Les **autres usagers sortent progressivement** dans un délai compris **entre ces deux valeurs**. Par exemple, s'il y a 30 usagers dans le bus, les usagers sortent, en moyenne, toutes les  $(300-90)/30=7$  s. Dans le cas d'un bus de ville non articulé, une étude de sensibilité des scénarios peut éventuellement considérer un délai plus court pour la sortie du dernier usager.

12. Feux-flash, ou équipements lumineux dynamiques de type chevrons.

Toutefois, ce délai doit être cohérent avec le nombre d'usagers présents dans le bus et justifié par un retour d'expérience local suffisamment solide, une sensibilisation particulière des chauffeurs, ou des exercices.

Une fois sortie du véhicule et en cohérence avec le fascicule 4 (cf. [1]) :

- les **usagers** dont la **visibilité** est **supérieure à 2 m**, **évacuent en s'éloignant du danger**, c'est-à-dire du foyer de l'incendie. Comme dans le fascicule 4, cette direction d'évacuation sera qualifiée, dans la suite du propos, de « bonne direction » et la direction opposée, qui rapproche les usagers du foyer de l'incendie, de « mauvaise direction » ;
- **en moyenne 50 % des usagers** dont la **visibilité** est **inférieure à 2 m** (visibilité « absente » au sens du fascicule 4) **partent dans la mauvaise direction**.

Une étude de sensibilité sera utile pour analyser le cas d'usagers dont la visibilité est supérieure à 2 m mais qui se rapprocheraient tout de même du danger pour accéder à une issue proche. De façon générale, afin d'éviter une trop grande dispersion des pratiques entre ESDs, il est opportun de limiter cette étude de sensibilité aux usagers à la visibilité claire se trouvant à environ 30 m d'une issue au niveau de laquelle il n'y a pas de fumée à hauteur d'hommes. Néanmoins, tant les caractéristiques particulières d'un ouvrage que le déroulement particulier d'un scénario peuvent justifier de la plausibilité du comportement des usagers.

Prise de conscience du danger	Hésitation	Décision	Sortie du véhicule	Début du déplacement
Selon critères	VL & PL : 90 s BUS : 90 s (1 <sup>er</sup> usager) à 300 s			Si $d$ (visibilité) < 2 m, 50 % des usagers partent dans la mauvaise direction

Tableau 1: De la prise de conscience du danger vers le début du déplacement.

### Vitesse de marche

En cohérence avec le fascicule 4 (cf. [1]) et les précisions apportées ci-avant, la vitesse de marche ( $v$ ) d'un usager est définie ci-après en fonction de sa distance de visibilité ( $d$ ) :

- $d < 2 \text{ m}$   $\Rightarrow v = 0,3 \text{ m.s}^{-1}$
- $2 \text{ m} \leq d < 10 \text{ m}$   $\Rightarrow v = 0,5 \text{ m.s}^{-1}$
- $10 \text{ m} < d$   $\Rightarrow v = 1 \text{ m.s}^{-1}$

Les valeurs de vitesse, définies ci-dessus par le fascicule 4, peuvent paraître faibles. Toutefois, elles tiennent compte de la présence éventuelle de personnes se déplaçant lentement comme des personnes âgées, de jeunes enfants ou des parents portant des bébés.

### Trajectoire

Si un usager est parti dans la bonne direction, des conditions de visibilité qui se dégradent en cours de déplacement ne lui feront pas changer de direction pour prendre la mauvaise. Autrement dit, **il n'y a qu'en début de déplacement qu'une visibilité inférieure à 2 m peut conduire certains usagers à choisir la mauvaise direction** (cf. sous-chapitre ci-dessus *Conditions initiales du déplacement*).

Par contre, **si un usager a pris la mauvaise direction** et se dirige vers le foyer de l'incendie plutôt qu'une issue de secours, il fait demi-tour à proximité du foyer lorsqu'il voit les flammes. Autrement dit, **il fait demi-tour si la distance  $d$  de visibilité du foyer est supérieure à la distance qui les sépare**. Pour le calcul de  $d$ , **le coefficient  $C$  de l'incendie est égal à 6**.

Il y a lieu de noter que seul le critère de visibilité peut inciter l'usager à faire demi-tour. Aucun autre critère (température, toxicité ou rayonnement) n'est recevable compte tenu de la surcharge sensorielle et du manque de lucidité, voire de la panique, provoqués par des conditions thermiques et/ou toxiques extrêmes.

### 5.1.3 Perte de la capacité d'auto-évacuation

Un usager perdra sa capacité d'auto-évacuation s'il endure l'une des conditions thermiques ou toxiques précisées ci-dessous :

- température :
  - **80°C** pendant **15 min** (source [1]) ;
  - **120°C instantanément**. En l'absence de données dans l'état de l'art prenant à la fois en compte l'action de la température sur l'épiderme et sur les voies respiratoires, ce seuil a été défini à dire d'expert, à partir de la norme 13571 ([9]) ;
- flux radiatif :
  - **2,5 kW/m<sup>2</sup>** pendant **2 min** ([1]). Les valeurs en deçà de ce seuil, sont tolérées pendant 30 min<sup>13</sup> ;
  - **5 kW/m<sup>2</sup> instantanément** (source [8]) ;
- toxicité définie à partir du taux de CO (source [9]) :
  - **3 000 ppm** pendant **12 min** ;
  - **5 000 ppm** pendant **7 min** ;
  - **7 000 ppm instantanément**.

13. Ces nouveaux éléments de référence doivent être considérés comme une actualisation de ceux référencés dans le fascicule 4 antérieure à la norme de référence NF ISO 13571. Selon cette norme la limite de tenabilité pour l'exposition de la peau à la chaleur radiante est approximativement de 2,5 kW·m<sup>-2</sup>. Au-dessous de ce niveau de flux de chaleur incident, l'exposition peut être tolérée pendant 30 min ou plus sans affecter de manière significative la tenabilité. Au-dessus de ce seuil, des formules permettent de calculer le délai avant brûlure de la peau au deuxième degré. Ce sont ces formules qui ont été utilisées pour estimer la durée avant perte de capacité d'auto-évacuation.

Il y a lieu de préciser qu'il n'existe pas dans l'état de l'art d'éléments qui permettraient de rendre compte de l'impact cumulé des différents types d'agressions (thermique et toxique) sur les usagers et de définir des seuils couplés pour la perte de la capacité d'auto-évacuation (par exemple X°C et Y ppm).

### 5.1.4 Applicabilité des éléments les plus avancés de l'état de l'art

Il existe **dans l'état de l'art des hypothèses plus complexes** que celle indiquées ci-avant **pour modéliser le déplacement des usagers. Si leur utilisation n'est pas exclue a priori, d'une part elles doivent être strictement cohérentes avec les normes ad-hoc (notamment [9]), d'autre part l'opportunité de les employer doit être rigoureusement justifiée** pour deux raisons principales indiquées et illustrées ci-après. En premier lieu, si certaines de ces hypothèses peuvent s'avérer plus exactes, par exemple mieux correspondre à la physiologie humaine, elles n'apportent une plus-value que dans de rares cas. En second lieu, d'autres peuvent reposer sur des partis pris acceptables dans certains contextes mais mal adaptés à celui des tunnels, et ainsi augmenter l'incertitude des résultats.

Concernant la plus-value limitée de ce type d'approche, des hypothèses reposant sur les éléments les plus avancés de l'état de l'art ayant fait consensus au sein de standards de référence (notamment [9]) ont été mis au point dans le cadre d'une convention de recherche entre le CETU et l'INERIS. Principalement, une nouvelle évaluation de la perte de capacité d'auto-évacuation et de la vitesse de marche a été proposée. Cette approche est succinctement expliquée en annexe 8 et davantage détaillée dans un article scientifique (cf. [11]). Comme explicité dans cet article, la comparaison avec les hypothèses classiques (précisées dans ce document) a montré qu'il n'y avait des différences significatives que dans de très rares cas. Il est succinctement expliqué pourquoi en annexe 8.

Concernant le cas d'hypothèses adaptées à certains contextes mais pas à celui des tunnels, on peut citer par exemple le cas des établissements recevant du public (ERP) dans lesquels il peut être acceptable de ne pas utiliser le coefficient  $C^{14}$  et de lier directement le coefficient  $K$  d'extinction à la vitesse de marche. En effet, le cheminement d'évacuation d'un ERP comporte le plus souvent uniquement des blocs autonomes d'éclairage de sécurité (BAES) pour guider l'auto-évacuation et les dispositifs additionnels sont plutôt rares et réservés à des cas particuliers (certains immeubles de grande hauteur par exemple).

Le coefficient  $C$  ne variera donc pas beaucoup d'un bâtiment à un autre. Dans le cadre des tunnels routiers, comme illustré au chapitre 5.1.2, les dispositifs de guidage lumineux et leur espacement peuvent varier significativement d'un ouvrage à un autre, donc les coefficients  $C$  peuvent être très différents.

### 5.1.5 Les zones de danger : une approche non recommandée

Certaines ESD utilisent des zones de danger pour décrire, de façon cumulative, des plages de visibilité, de toxicité, de température et de rayonnement. Chaque plage correspond à un niveau de criticité ; par exemple, une zone de danger est définie par les plages suivantes :  $80^{\circ}\text{C} \leq T^{\circ} < 120^{\circ}\text{C}$ ,  $3\ 000\ \text{ppm} \leq \text{taux de CO} < 7\ 000\ \text{ppm}$ ,  $2,5\ \text{kW/m}^2 < \text{rayonnement} < 5\ \text{kW/m}^2$ ,  $2\ \text{m} \leq \text{visibilité} < 10\ \text{m}$ .

Ces **zones de danger** sont **fortement déconseillées** pour plusieurs raisons explicitées ci-après.

Comme indiqué au 5.1.3, il n'existe pas, dans l'état de l'art, d'éléments permettant de rendre compte de l'impact du cumul d'effets des différents types d'agressions (thermique et toxique). Donc, il n'y a **pas de fondement scientifique à la définition de ces zones**. Une **hétérogénéité des pratiques** a d'ailleurs pu être constatée et est nuisible à la « fiabilité collective » des ESD. Même si l'état de l'art évoluait pour inclure des éléments scientifiques stabilisés et consensuels qui permettraient de consolider la définition de ces zones, d'autres inconvénients subsisteraient toujours.

Tout d'abord, ces zones **mélagent plusieurs paramètres différents**. Or ces paramètres n'ont **pas le même nombre de seuils en matière d'impact sur les usagers** ni les mêmes conséquences par seuil en termes de perte de capacité d'évacuation. Cet aspect **nuît à la clarté des graphiques** dans lesquels ces zones sont représentées, donc à l'analyse et sa lisibilité. Par exemple, il n'y a que deux seuils de température alors qu'il y a trois seuils de toxicité.

Ensuite, une représentation graphique par zone de danger **masque inévitablement des informations**. Par exemple, la zone de danger comportant un seuil de température de  $80^{\circ}\text{C}$  « masquera » une toxicité de 2 000 ppm qui appartient à une zone de criticité inférieure.

Il est donc **fortement conseillé** de s'en tenir à un traitement indépendant de chacun des paramètres en utilisant les seuils définis au 5.1.3. Les représentations graphiques qui en découlent sont explicitées au 5.3.

14. Comme indiqué au 5.1.2,  $C$  est un coefficient qui dépend des conditions d'éclairage et du contraste de l'objet à voir.

## 5.2 MODÉLISATION DE L'INCENDIE : HYPOTHÈSES

### 5.2.1 Courbes de référence pour les feux de bus

Pour les bus urbains non articulés, on peut utiliser la courbe correspondant au feu de PL sans chargement (figure 9 page C10 du fascicule 4 (cf. [1])).

Pour les bus urbains articulés, on utilisera cette même courbe en ajoutant un plateau de puissance de 10 minutes à 30 MW.

Pour les cars de tourisme, le plateau sera de 20 minutes à 30 MW.

### 5.2.2 Articulation des simulations 1D et 3D

Un calcul 1D est généralement plus fiable et adapté que la simulation 3D pour évaluer les courants d'air en tunnel à partir de conditions aux limites en pression. Le calcul 1D est également très utile pour évaluer le comportement aérodynamique général du tunnel vis-à-vis de la puissance du feu ou de l'emplacement de l'incendie par exemple, prendre en compte aisément le pistonement, etc. Il est donc nécessaire de procéder à une modélisation 1D avant les éventuels calculs 3D, afin d'obtenir des conditions aux limites à appliquer sur le modèle 3D, que celui-ci représente l'ensemble de l'ouvrage ou seulement une partie. Pour rappel, le fascicule 4 (cf. [1]) donne des indications concernant le choix du niveau de modélisation adapté.

### 5.2.3 Géométrie du foyer

La géométrie du foyer modélisé sera cohérente avec le véhicule en feu considéré et les surfaces de référence du fascicule 4 [1].

On a pu constater que la géométrie des surfaces modélisées comme combustibles influait significativement sur les résultats en termes de stratification des fumées et de température en plafond. Dans le cas des ESD, il convient de **retenir la géométrie la moins favorable à la stratification et la plus réaliste, à savoir un foyer constitué par l'ensemble des surfaces apparentes du bloc représentant le véhicule incendié.**

Par ailleurs, cette importante surface de foyer implique une puissance surfacique très faible au début de l'incendie, ce qui n'est pas réaliste. **Il est donc préférable de diviser la surface de foyer en quelques zones (par exemple 4), de surfaces approximativement identiques, sur lesquelles la puissance**

**surfacique croît de manière décalée dans le temps.** Par exemple, considérons un feu atteignant la puissance de 30 MW en 10 minutes. On divisera la surface du foyer en 4 parties ; celle correspondant à l'avant du véhicule incendié commencera à « brûler » à  $t = 0$  (départ de feu dans le moteur) et atteindra une puissance de 7,5 MW en 2 min 30 ; puis la partie voisine commencera à son tour à « brûler » pour atteindre elle aussi 7,5 MW à  $t = 5$  min, etc.

Bien évidemment, cette division doit permettre de strictement respecter la courbe de référence choisi en fonction du type de véhicules. Ces courbes de références sont définies dans le chapitre C4 du fascicule 4 [1] ;

### 5.2.4 Spécification des termes sources de CO et suies dans les modèles 3D

Les ESD sont réalisées à l'aide de modèles de combustion simples de type fraction de mélange, voire sans modèle de combustion. Les modèles chimiques plus complexes impliquent des temps de calcul très élevés, et la standardisation des termes sources permet une comparaison plus aisée.

La spécification des termes sources d'opacité et de toxiques nécessite un calcul préalable à partir des préconisations du fascicule 4 (cf. [1]), afin de les mettre sous une forme compatible avec l'outil de calcul utilisé. Selon les cas, il peut s'agir soit d'une spécification directe de la production de suies (en  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ) (ou d'opacité en  $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ) et de monoxyde de carbone (en  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ), soit d'un ensemble de paramètres caractérisant la réaction de combustion :

- chaleur de combustion du combustible (en  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) ;
- taux de production massique de CO et de suies en proportion de la masse de combustible consommé (sans dimension).

C'est notamment ce dernier principe qui est utilisé dans FDS<sup>15</sup>. Pour une bonne cohérence entre les études, on cherche à normaliser la production de suies et de toxiques par MW de puissance, qui est donnée par le rapport entre le taux de production et la chaleur de combustion et s'exprime en  $\text{g}\cdot\text{MJ}^{-1}$  ou  $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{MW}^{-1}$ . Il est néanmoins préférable que chacun des termes reste réaliste individuellement. Les chaleurs de combustion des hydrocarbures sont parmi les plus fortes de tous les composés chimiques hors dihydrogène, avec des valeurs de 40 à 45  $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . On retrouve des valeurs semblables pour le caoutchouc synthétique et de nombreux plastiques (mousse polyuréthane par exemple). Pour ce type de matériaux, le taux de production de suies est important, de l'ordre de 8 à 10 %.

15. *Fire Dynamics Simulator* : FDS est un code de calcul spécialisé dans les simulations d'incendies. Son modèle hydrodynamique permet de résoudre numériquement les équations de Navier-Stokes appropriées à des écoulements thermiques à faible vitesse et en particulier aux transports de chaleur et de fumée d'un foyer.



On peut montrer que les paramètres suivants correspondent aux prescriptions du fascicule 4 :

- chaleur de combustion  $24 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  (dans FDS : HEAT\_OF\_COMBUSTION=24000) ;
- taux de production de suies 4 % (dans FDS : SOOT\_YIELD=0.04) ;
- taux de production de CO 6,4 % (dans FDS : CO\_YIELD=0.064).

Le taux de production de CO augmente fortement en conditions sous-ventilées, c'est-à-dire lorsque l'apport d'air est suffisamment faible pour que la combustion soit pilotée par la disponibilité de l'oxygène, et non du combustible. Cependant, ces conditions sont rares en tunnel<sup>16</sup>, sauf dans certaines parties « cachées » des foyers. Pour tenir compte de l'existence de zones sous-ventilées, le taux de production de CO peut être porté à **8 %**.

Le résultat en termes de production massique est une **production de 1,7 g de suies par seconde et par MW de puissance thermique**, et une **production de CO de  $2,7 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{MW}^{-1}$** . On peut faire varier la chaleur de combustion et les taux de production dans les mêmes proportions pour conserver les mêmes productions massiques ; ce type de modification (en restant dans des ordres de grandeur réalistes) aura en général un impact marginal sur les résultats en termes d'enfumage du tunnel. Notons que tous les paramètres listés dans le fascicule 4 n'ont pas la même importance. La production de  $\text{CO}_2$ , par

exemple, est essentiellement un intermédiaire de calcul et n'a pas d'influence sur l'analyse finale.

Dans FDS, il est également nécessaire de préciser la composition chimique du combustible, au moins en carbone, hydrogène et oxygène. On pourra utiliser les valeurs :  $C = 2,76$ ,  $H = 1,7$ ,  $O = 0,7$  pour rester le plus proche possible des prescriptions du fascicule 4 (production de  $\text{CO}_2$  notamment) ; des variations raisonnables de ces paramètres ont un impact minime sur l'enfumage calculé et affectent essentiellement la géométrie des flammes.

Les précisions ci-avant aideront à conduire une démarche de spécification des caractéristiques de la réaction de combustion. Il est indispensable d'entreprendre une telle démarche afin de ne pas sous-estimer les conditions de désenfumage. Par exemple, les paramètres par défaut de FDS correspondaient, dans d'anciennes versions, à la combustion du propane qui génère très peu de suies. Conserver ces valeurs par défaut conduirait à une évaluation très optimiste des conditions d'enfumage. Un problème similaire subsiste dans les nouvelles versions de FDS où la production de suies est nulle par défaut.

Les paramètres découlant des caractéristiques retenues doivent apparaître avec les autres données d'entrée du calcul, comme les dimensions des mailles et les conditions aux limites, comme demandé par le paragraphe D.3 du fascicule 4, qui reste d'actualité. Il est essentiel de mentionner l'ensemble des paramètres, et notamment la chaleur de combustion ; dans le cas contraire, il est impossible de connaître les termes sources complets.

## 5.3

# LA CONSTRUCTION DES GRAPHIQUES SUPPORTS DE L'ANALYSE

**Quatre graphiques « espace-temps »** doivent être établis **par scénario**. Chacun représente l'évolution d'un des quatre paramètres principaux influençant l'évacuation (**visibilité, température, toxicité, rayonnement**). Le **déplacement des personnes** est représenté **dans les quatre graphiques** même si seule la visibilité influence la trajectoire et la vitesse de marche (cf. 5.1). Les autres paramètres n'interviennent que pour l'arrêt du déplacement (perte d'évacuation). La trajectoire représentée est ainsi la même dans les quatre graphiques.

### 5.3.1 Choix des valeurs transversales et altimétriques de la modélisation 3D

Les graphiques sont construits en **deux dimensions** avec un axe dédié au temps et un **axe dédié à la position longitudinale**

dans l'ouvrage. En cas de modélisation à trois dimensions, il est donc nécessaire de définir comment seront choisies les valeurs altimétriques et transversales. Les **valeurs altimétriques** seront prises à **hauteur d'homme, soit 2 m**, de façon conservatoire. Il est difficile d'affecter à l'usager une position transversale privilégiée (variable d'un usager à l'autre et en cours de déplacement). En outre, le choix d'une telle position peut engendrer des effets de bords constatés par le passé (entre une position transversale particulièrement défavorable et une autre plus favorable). En conséquence, **sauf cas particulier à justifier, la valeur transversale moyenne de chaque paramètre sera utilisée** pour construire les quatre graphiques et analyser les conditions d'évacuation. Les points singuliers seront exclus, par exemple les points correspondant à la présence d'un PL.

16. Pour une large gamme de combustibles, la chaleur dégagée peut être estimée avec une bonne précision à partir de la consommation d'oxygène, le facteur de conversion étant de  $13,1 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Un feu de 200 MW nécessite donc un apport d'oxygène de  $15,3 \text{ kg/s}$ , ce qui correspond à environ  $55 \text{ m}^3/\text{s}$  d'air, soit une vitesse de l'ordre de  $1 \text{ m/s}$  dans un tunnel de section courante. Les foyers globalement sous-ventilés sont donc rares.

### 5.3.2 Illustration du déplacement des usagers

La ligne illustrant le déplacement des usagers d'un véhicule peut être une simple translation de celle correspondant au véhicule voisin et le résultat en termes d'évacuation être identique. Il n'est donc pas nécessaire qu'une ligne corresponde systématiquement aux occupants d'un seul véhicule ce qui est susceptible de rendre les graphiques peu lisibles. **Une ligne peut donc être représentative de plusieurs véhicules.** Lorsque c'est le cas, il s'agit d'**indiquer graphiquement quels véhicules chaque ligne représente ou a minima leur nombre.** Il y a lieu d'**identifier et représenter** dans les graphiques **toutes les lignes pertinentes**, c'est-à-dire représentant une trajectoire différente des autres et affectée par un des paramètres influençant l'évacuation. **Les deux lignes d'extrémités relatives au premier usager qui n'est pas affecté de chaque côté du foyer doivent également être représentées.** Ces dernières bornent la (ou les) zone(s)<sup>17</sup> où l'évacuation est affectée, ce qui facilite leur identification.

En début de déplacement, lorsque les conditions de visibilité sont inférieures à 2 m, un certain nombre d'**usagers partent dans la mauvaise direction**, c'est-à-dire la direction opposée à celle facilitant l'évacuation. Les graphiques doivent systématiquement **les distinguer de ceux choisissant la bonne direction** (par exemple avec des lignes pointillées en lieu et place de lignes continues).

Un symbole doit **représenter** sur le graphique **la position et le moment où une trajectoire s'interrompt** parce que les **usagers perdent leur capacité d'évacuation.**

### 5.3.3 Articulation entre les différentes illustrations

Dans les **différentes illustrations**, les **légendes et annotations** doivent permettre de **faire clairement le lien entre elles**, par exemple entre les graphiques espaces-temps et les coupes transversales illustrant le phénomène de stratification (cas de la modélisation 3D).

## 5.4 LES PRINCIPES DE L'ANALYSE

### 5.4.1 Spatialisation, temporalisation et quantification de l'analyse

Pour **chaque scénario**, le **chronogramme général de l'évolution** est d'abord présenté.

Dans chaque scénario, l'analyse doit ensuite permettre de rapidement **comprendre ce qu'il advient des usagers dans les différentes zones du tunnel et pourquoi.** Elle met notamment en exergue **l'impact des conditions environnantes sur les déplacements, décrit les trajectoires** suivies et conclut quant à l'évacuation. Pour ce faire, **l'analyse doit être spatialisée, temporalisée et quantifiée** sur la base des **graphiques espaces-temps.** Par exemple, « entre 50 et 100 m du foyer, le groupe d'usagers présents comportant 7 individus commencera à sortir des véhicules à partir de  $T_0 + 1$  min 30 s, rencontrera une zone de visibilité inférieure à 10 m entre  $T_0 + 3$  min et  $T_0 + 4$  min qui fera chuter leur vitesse à 0,5 m/s. Ils seront soumis à une température comprise entre 40°C et 60°C entre  $T_0 + 3$  min 30 s et  $T_0 + 4$  min mais parviendront tous à évacuer à  $T_0 + 5$  min ». Dans cette analyse, il s'agit de **souligner les carences éventuelles des dispositions prévues** mais aussi la **contribution positive des équipements**, notamment des issues de secours et du désenfumage. La **précision des valeurs**, notamment de distance et de localisation, doit être **cohérente** avec les **incertitudes liées aux modélisations.**

### 5.4.2 Récapitulatif concernant la perte d'auto-évacuation

Le **nombre d'usagers perdant leur capacité d'auto-évacuation** est donné **pour chaque scénario** et doit être cohérent avec son analyse. Pour déterminer ce nombre, il s'agit de tenir compte des incertitudes inhérentes aux modélisations effectuées. Ainsi, si la trajectoire d'un groupe d'usagers est en bordure d'une zone dans laquelle ils perdraient leur capacité d'auto-évacuation (par ex, zone avec une forte température), on pourra considérer qu'au moins 50 % d'entre eux la perde (sous entendu, vis-à-vis de la modélisation, la zone est un peu plus étendue ou les usagers se déplacent un peu différemment). Un **tableau** précise le nombre d'usagers **par zone pertinente** et éventuellement par type de véhicules (bus notamment) pour le cas de base et des tableaux similaires apportent ces précisions pour les cas de sensibilité. Ces **résultats distinguent usagers partant dans la mauvaise direction et usagers partant dans la bonne.**

Bien entendu, **ces résultats ne sauraient servir à établir un indicateur quantifié du risque** qui n'aurait pas de sens pour ce type de méthode. Mais ils contribueront à clarifier l'analyse.

17. Il peut y avoir plus d'une zone en cas de refroidissement et déstratification des fumées à distance du foyer par exemple.

### 5.4.3 Études de sensibilité

Comme indiqué au chapitre 5.1.2, dans le processus d'évacuation, la prise de conscience du danger est suivie d'une **phase comprenant l'hésitation, la prise de décision et la sortie du véhicule**.

Dans des scénarios bien choisis, il est utile de mener une **étude de sensibilité sur la durée de cette phase** par exemple en l'allongeant de 90 à 180 secondes y compris pour les bus (ce sera alors le délai d'évacuation du premier usager). Ces scénarios pourraient par exemple être ceux où tous les usagers parviennent à évacuer mais où l'analyse montre que certains d'entre eux ont rencontré des conditions environnementales défavorables et/ou sont passés à proximité de zones susceptibles de leur faire perdre la capacité d'auto-évacuation.

Le **lancement retardé de la ventilation** peut également s'avérer être un cas de sensibilité instructif correspondant à une difficulté dans la détection ou l'identification de l'incident.

### 5.4.4 Une analyse par scénario à relativiser

Enfin, l'**analyse** des résultats doit être effectuée **au regard du scénario considéré** et du choix de ses paramètres. Par exemple, des conséquences significatives doivent être relativisées si les paramètres choisis sont défavorables et il s'agit de tenir compte des enjeux du système pour déterminer ce qu'on peut raisonnablement en attendre.

### 5.4.5 Synthèse de l'ensemble des scénarios

Une **synthèse** de l'analyse de l'ensemble des scénarios **présente d'abord tous leurs résultats** en les **reliant aux événements déclenchants** dont ils sont issus. Cette présentation pourra très utilement reposer sur un **tableau de synthèse faisant état, par scénario, du nombre d'usagers perdant leur capacité d'auto-évacuation**. Puis, elle fait état des **principaux enseignements**, notamment des **carences identifiées** dans le système et de ses **points forts**. Cette synthèse doit prendre **du recul vis-à-vis des cas particuliers sélectionnés**.

## LA CONCLUSION DE L'ESD

L'ESD est une pièce importante qui vaut analyse des risques au sens de la directive européenne de 2004. La méthodologie de son élaboration doit être respectée et ses conclusions doivent être conformes au chapitre B.5 du fascicule 4 (cf. [1]).

La conclusion de l'ESD **rappelle** de façon **synthétique** le contenu des **différentes étapes** de la méthode et les **principaux résultats**, ainsi qu'une synthèse de la comparaison à l'IT même si cette dernière a été présentée dans l'état de référence du dossier.

Il est notamment mis en exergue **le rôle et l'impact des dispositions concourant à la sécurité** ainsi que les **améliorations ou compléments nécessaires**. Les **éléments utiles à l'exploitation** sont aussi récapitulés.

Sur cette base, l'ESD qualifie le **niveau de sécurité**<sup>18</sup>, dans une **logique GAME** (cf. 2.1) sauf s'il n'y a aucun écart au référentiel de l'IT 2000. Elle rend notamment compte de la **capacité du système à faire face aux dangers**.

Des mesures complémentaires pourront être proposées et devront être justifiées à l'aune de l'analyse des risques ou d'autres parties de l'ESD.

Dans cette conclusion, il est important de prendre du **recul vis-à-vis des résultats**. Elle doit également pointer les inévitables **limites inhérentes à ce type d'étude**, notamment les incertitudes sur les modélisations et les résultats.

---

18. Pour rappel, l'évaluation du niveau de sécurité est clairement à distinguer de l'analyse des risques. L'analyse permet de comprendre le risque et de l'estimer, l'évaluation du niveau de sécurité permet d'indiquer si le niveau de sécurité est satisfaisant en fonction de critères liés au risque.

# ANNEXE : SYNTHÈSE DES PARAMÈTRES D'ÉVACUATION

<b>Visibilité</b>	
<b>Distance (d) : <math>d = C/K</math></b>	
C = 6	Issues espacées d'environ 100 m + feux flash + dispositifs dynamiques de guidage (ex chevrons)
C = 5	Issues espacées d'environ 200 m + feux flash + dispositifs dynamiques de guidage (ex chevrons)
C = 4	Issues espacées d'environ 400 m + feux flash + dispositifs dynamiques de guidage (ex chevrons)
C = 3	Issues espacées d'environ 400 m + feux flash
C = 2	Pas d'issues
K	Coefficient d'extinction calculé à 2 m de hauteur
<b>Classes de visibilité</b>	
$d < 2$ m	Visibilité absente
$2 \text{ m} \leq d < 10$ m	Visibilité fortement gênée
$10 \text{ m} < d$	Visibilité claire
<b>Déclenchement du déplacement</b>	
<b>Prise de conscience du danger</b>	
<b>Conditions générales</b>	
Usager dans le véhicule derrière celui incendié (10 m entre pare-chocs avants) : puissance ~1 MW	
Autre usager :	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• fumées atteignant sa position longitudinale (stratifiées ou non) avec <math>K_{\text{fumées}} = 0,4 \text{ m}^{-1}</math></li> <li>• visibilité d'un autre usager en train d'évacuer</li> </ul>	
<b>Conditions additionnelles pour dispositifs visuels et sonores</b>	
Dès activation des dispositifs sonores	
Si visibilité des dispositifs visuels activés	
Obligation d'études de sensibilité où ces dispositifs sont inefficaces sur les usagers	
<b>Sortie du véhicule</b>	
VL & PL	90 s
Bus	90 s (1 <sup>er</sup> usager) à 300 s
<b>Début du déplacement</b>	
$d < 2$ m	En moyenne 50 % des usagers partent dans la direction la plus défavorable à leur survie
<b>Vitesse de marche</b>	
$d < 2$ m	$v = 0,3 \text{ m.s}^{-1}$
$2 \text{ m} \leq d < 10$ m	$v = 0,5 \text{ m.s}^{-1}$
$10 \text{ m} \leq d$	$v = 1 \text{ m.s}^{-1}$
<b>Trajectoire</b>	
Un usager qui se dirigeant vers l'incendie fera demi-tour avant d'atteindre celui-ci lorsque $d$ est supérieure à la distance entre l'usager et le foyer avec $C = 6$	

Tableau 2 : Cinétique de l'évacuation des usagers.

Un usager perd sa capacité d'auto-évacuation s'il endure l'une des conditions ci-après :

<b>Température</b>	
80° C	Pendant 15 min
120°C	Immédiatement
<b>Flux radiatif</b>	
2,5 kW/m <sup>2</sup>	Pendant 2 min (30 min en deçà de 2,5 kW/m <sup>2</sup> )
5 kW/m <sup>2</sup>	Immédiatement
<b>Toxicité</b>	
3000 ppm	Pendant 12 min
5000 ppm	Pendant 7 min
7000 ppm	Instantanément

Tableau 3 : Perte de la capacité d'auto-évacuation.

# ANNEXE : APPROCHE CETU-INERIS ISSUE DE L'ÉTAT DE L'ART : PRÉSENTATION SUCCINCTE

Principalement, l'approche CETU-INERIS complète les seuils présentés au chapitre 5.1.3 par la notion de dose qui permet de traduire plus fidèlement la manière dont la température et les toxiques agissent de façon cumulative sur le corps humain. Elle propose également une nouvelle formule pour la vitesse de marche qui permet de traduire l'impact de la visibilité, de la température, et de la toxicité. Ces deux éléments complémentaires sont détaillés ci-après.

La dose toxique est issue de la norme 13571 ([9]):

$$FED = \int_{t_1}^{t_2} \frac{C_{CO}}{35000} dt$$

l'hyperventilation due au CO<sub>2</sub> des fumées a été prise en compte :

$$V_{CO_2} = e^{\frac{\Phi_{CO_2}}{5}}$$

$V_{CO_2}$  coefficient de correction ;  $\Phi_{CO_2}$  fraction volumique en ppm.

La dose thermique est issue de la même norme sachant que, dans le contexte particulier du tunnel, il n'a pas été tenu compte de l'effet radiatif<sup>19</sup> :

$$X_{FED}^{th} = \int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{1}{t_{conv}} \right) dt$$

avec :

- $t_{conv} = (4,1 \cdot 10^8) * T(t)^{-3,61}$  pour les personnes totalement vêtues ;
- $t_{conv} = (5 \cdot 10^7) * T(t)^{-3,4}$  pour les personnes faiblement vêtues.

Ces doses introduisent deux nouveaux critères de perte de capacité de déplacement :

- la dose toxique en équivalent CO (telle que définie par la norme 13571) atteint 35000 ppm.min ;
- la dose thermique réduite aux effets convectifs atteint 1 (effets de brûlure).

Pour la vitesse de déplacement, il a été établi la formule suivante :

$$v = f_1(K_s) \cdot f_2(\rho) \cdot f_3(T)$$

avec :

- $f_1(K_s) = \max(f_{1min}, -67,154 \cdot K_s^3 + 55,033 \cdot K_s^2 - 14,876 \cdot K_s + 2,3133)$
- $f_2(d_{CO}) = \min(1; -0,289 \cdot \ln(d_{CO}) + 3,0604)$

$$f_3(T) = \begin{cases} v_0 & \text{si } T_0 < T < T_{\sigma 1} \\ v_0 + \frac{(v_{max} - v_0) \left( \frac{T - T_{\sigma 1}}{T_{\sigma 2} - T_{\sigma 1}} \right)^2}{v_{max}} & \text{si } T_{\sigma 1} < T < T_{\sigma 2} \\ v_{max} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{T - T_{\sigma 2}}{T_d - T_{\sigma 2}} \right)^2 \right] & \text{si } T_{\sigma 2} < T < T_d \end{cases}$$

avec :

- $v_{max} = 1,6 \text{ m/s}$ ,  $v_0 = 1 \text{ m/s}$ ,
- $T_{\sigma 1} = 30^\circ\text{C}$ ,  $T_{\sigma 2} = 60^\circ\text{C}$

$T_0$  est la température ambiante ;  $T_d = 120^\circ\text{C}$ .

Cette nouvelle approche a été comparée avec celle présentée dans le présent document. Cette comparaison a montré, qu'à de rares exceptions, les résultats ne sont pas significativement différents.

Il y a deux explications à ce constat. D'une part, la cinétique des phénomènes et les modalités de déplacement des usagers conduisent à ce qu'ils aient soit évacué, soit aient été confrontés à des seuils leur faisant perdre leur capacité d'auto-évacuation bien avant que les doses thermiques ou toxiques ne deviennent critiques. D'autre part, la nouvelle formule de vitesse de marche ne modifie que de façon marginale le déplacement des usagers et n'a pas ou peu d'impact sur les résultats.

19. L'effet radiatif n'intervient réellement qu'à proximité du foyer où les usagers ne restent pas suffisamment longtemps dans les conditions adéquates pour que cet effet ait un impact sauf rares exceptions (par exemple si une personne est sérieusement blessée dans un accident).

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] CETU, Guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers, « Fascicule 4 – Les études spécifiques des dangers », 2003.
- [2] Arrêté du 18 avril 2007 portant application des dispositions des articles R.118-3-9 et R.118-4-4 du Code de la voirie routière et relatif à la composition et la mise à jour des dossiers préliminaires et de sécurité et au compte-rendu des incidents et accidents significatifs.
- [3] Instruction technique relative aux dispositions de sécurité dans les nouveaux tunnels routiers (conception et exploitation), annexe 2 à la circulaire interministérielle n°2000-63 du 25 août 2000 abrogée (l'annexe 2 est maintenue en vigueur par la circulaire 2006-20).
- [4] CETU, Note d'information n°21, « Le cadre réglementaire de la sécurité des tunnels routiers », 2011.
- [5] CETU, Guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers, « Fascicule 3 – Les analyses des risques liés au transport des marchandises dangereuses », 2018.
- [6] CETU, Note d'information n°23, « Définition des fonctions de sécurité – Application aux modes d'exploitation dégradée et aux conditions minimales d'exploitation », 2014.
- [7] CNESOR, « Commission nationale d'évaluation de la sécurité des ouvrages routiers – Bilan et principaux enseignements des dossiers examinés sur la période 2013-2017 », 2021.
- [8] Arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation.  
NOR: DEVP0540371A – Version consolidée au 8 décembre 2017, 2005.
- [9] NF ISO 13571, « Lignes directrices pour l'estimation du temps disponible avant que les conditions de tenabilité ne soient compromises » ; « *Life-threatening components of fire – Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data* », 2012.
- [10] CETU, Les documents d'information, « Signalisation et dispositions d'accompagnement de l'auto-évacuation des usagers dans les tunnels routiers. », 2010.
- [11] Truchot B, Willmann C, Guivarch J, « *People evacuation in tunnel fires: a cross evaluation of two methodologies* », 3rd ESFSS conference, 2018.

### CONTRIBUTEURS

Christophe Willmann et Antoine Mos ont participé à l'élaboration de ce document sur la base d'une concertation avec les bureaux d'étude BG, EGIS, SETEC, INGEROP, LOMBARDI et, en fin de processus, ARCADIS.

## Centre d'Études des Tunnels

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

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



**MINISTÈRE  
CHARGÉ  
DES TRANSPORTS**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

