

# Guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers

Fascicule 4

Les études spécifiques des dangers (ESD)

Septembre 2003



*Liberté • Égalité • Fraternité*  
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE



ministère  
de l'Équipement  
des Transports  
du Logement  
et de la Mer

# Le Guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers

Pour chaque tunnel du réseau routier national d'une longueur supérieure à 300 mètres, un dossier de sécurité doit être établi et soumis au préfet qui saisit, pour avis, le comité d'évaluation de la sécurité des tunnels routiers (CESTR).

Tous les acteurs ayant une responsabilité dans la sécurité du tunnel (maître d'ouvrage, exploitant, services d'intervention et de secours, préfecture) doivent participer à l'élaboration de ce dossier qui, une fois constitué, contient notamment les éléments fondateurs de l'exploitation de l'ouvrage en toutes circonstances.

C'est à l'intention de tous ces services et aussi des maîtres d'œuvre et des bureaux d'études que le **guide des dossiers de sécurité**<sup>1</sup> est rédigé.

Le document introductif «Finalités du dossier de sécurité» est paru en mars 2003. Sa lecture est recommandée à toutes les personnes qui souhaitent comprendre le sens général de la démarche préconisée et l'articulation des différentes pièces constitutives du dossier de sécurité.

Le **guide des dossiers de sécurité**, dont le document qui vient d'être cité constitue en quelque sorte le «fascicule 0», comprend les **cinq fascicules** suivants, parus ou à paraître en 2003 et 2004:

- **fascicule 1** : Modalités d'élaboration du dossier de sécurité;
- **fascicule 2** : Tunnels en exploitation «de l'état des lieux à l'état de référence» (juin 2003);
- **fascicule 3** : Les études des risques liés au transport des marchandises dangereuses;
- **fascicule 4** : **Les études spécifiques des dangers (ESD) (septembre 2003)**;
- **fascicule 5** : Le plan d'intervention et de sécurité (PIS).

## *Contexte réglementaire*

- La circulaire interministérielle n° 2000-63 du 25 août 2000, relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national, prescrit au maître d'ouvrage (en association avec l'exploitant pour les tunnels en service) l'établissement d'un dossier de sécurité pour tous les tunnels d'une longueur supérieure à 300 m.
- La circulaire n° 2000-82 du 30 novembre 2000 a complété la circulaire n° 2000-63 en ce qui concerne la circulation des véhicules transportant des marchandises dangereuses dans les tunnels routiers du réseau national.
- Le décret d'application aux tunnels routiers de la loi du 3 janvier 2002 relative à la sécurité des infrastructures et systèmes de transport, actuellement en préparation, devrait confirmer ce dispositif et l'étendre à tous les ouvrages des collectivités locales d'une longueur supérieure à 300 mètres.

<sup>1</sup> Ce guide remplace de manière plus complète le document intitulé: *Les Études Spécifiques des Dangers (ESD) pour les tunnels du réseau routier, guide méthodologique, version provisoire*, paru en juillet 2001.

# Fascicule 4

## Les études spécifiques des dangers (ESD)

### Introduction

L'étude spécifique des dangers (ESD) prend en compte le tunnel comme un système global, constitué par les usagers, l'ouvrage lui-même avec ses équipements et son environnement, l'exploitant et les services d'intervention et de secours.

C'est une pièce maîtresse du dossier de sécurité, quelle que soit l'étape concernée (tunnel en projet ou à mettre en service, tunnel en exploitation).

La **partie A** du fascicule explique le rôle de l'ESD dans le dossier de sécurité et donne au maître d'ouvrage quelques conseils de portée générale.

La **partie B** du fascicule présente chapitre par chapitre le contenu de l'ESD et la méthodologie d'étude recommandée. L'accent est mis particulièrement sur le choix des scénarios (chapitre B.3).

Enfin, dans les **annexes**, les personnes chargées du pilotage ou de la réalisation de l'ESD, notamment les bureaux d'études, trouveront des recommandations pratiques et des valeurs standardisées de certains paramètres.



# Partie A - Le rôle de l'étude spécifique des dangers dans le dossier de sécurité

L'annexe 1 de la circulaire n° 2000-63 du 25 août 2000 impose pour tous les tunnels d'une longueur supérieure à 300 mètres (en projet, à mettre en service ou en exploitation), que le dossier de sécurité contienne une **étude spécifique des dangers** (ESD).

Selon les termes de la circulaire, cette étude :

- « décrit les accidents, quelle que soit leur origine, susceptibles de se produire en phase d'exploitation ainsi que la nature et l'importance de leurs conséquences éventuelles » ;
- « précise et justifie les mesures propres à réduire la probabilité que ces accidents surviennent et leurs conséquences ».

## Nature de l'étude

L'élaboration d'un projet de tunnel, de même que la vérification d'un ouvrage en exploitation, sont menées composant par composant, même si bien sûr, les interactions entre composants sont étudiées.

Par rapport à ces démarches principalement sectorielles et techniques, l'ESD est une démarche transversale qui prend en compte le tunnel comme un système global constitué par les usagers, l'ouvrage lui-même avec ses équipements et son environnement, l'exploitant et les services d'intervention et de secours. Elle se fonde explicitement sur l'étude des enchaînements d'événements susceptibles de provoquer des dommages graves aux personnes.

L'étude se déroule selon le plan suivant (décrit et commenté dans la partie B) :

- *Chapitre 1 : présentation du tunnel et de son environnement ;*
- *Chapitre 2 : description fonctionnelle du tunnel ;*
- *Chapitre 3 : identification des dangers et choix des scénarios ;*
- *Chapitre 4 : étude de scénarios ;*
- *Chapitre 5 : synthèse.*

# Partie A - Le rôle de l'étude spécifique des dangers dans le dossier de sécurité

## Place de l'étude dans le dossier de sécurité

L'ESD est une pièce maîtresse du dossier de sécurité. Elle se fonde sur l'état de référence du tunnel et peut conduire à lui apporter des améliorations. Elle fournit des éléments pour l'établissement des documents d'exploitation.

Pour un **tunnel nouveau**, l'état de référence technique et organisationnel est celui projeté pour l'ouverture à la circulation.

Au stade du **POA (ou APOA)**, un certain nombre d'équipements peuvent être définis dans leurs principes, mais pas nécessairement dans leurs modalités effectives de mise en oeuvre. La situation est semblable en ce qui concerne l'organisation de l'exploitation et des secours (internes et externes). Même si le fonctionnement du tunnel et de son exploitation restent pour cette raison, en partie, au niveau des principes, l'ESD doit traiter de manière cohérente et exhaustive l'ensemble des aspects de la sécurité afin de fournir les bases d'un référentiel en matière de sécurité (celui qui sera visé à l'occasion de l'ouverture à la circulation et ultérieurement en exploitation). Elle doit tout particulièrement examiner l'impact sur la sécurité des éventuelles différences par rapport à l'instruction technique et des dispositions destinées à les compenser.

Au stade de **l'ouverture à la circulation**, par rapport au dossier de sécurité établi pour le stade antérieur<sup>1</sup> et qui a fait l'objet d'un avis du comité d'évaluation et du Préfet, l'ESD peut faire l'objet d'une mise à jour pour tenir compte des précisions apportées et des évolutions intervenues depuis lors (prévisions de trafic, dispositions de sécurité effectivement mises en oeuvre, etc.). Elle doit en outre faire la preuve que les principes énoncés dans la précédente ESD ont effectivement été appliqués.

Pour un **tunnel en exploitation** à la date de signature de la circulaire, toutes les données concernant le tunnel et son exploitation sont disponibles, ainsi que le retour d'expérience depuis la mise en service. Le **fascicule 2** «Tunnels en exploitation "de l'état des lieux à l'état de référence"» fournit des indications pour procéder à l'état des lieux et définir le programme d'amélioration technique et organisationnel qui, une fois mis en oeuvre, permet d'atteindre l'état de référence. L'ESD se fonde sur cet état de référence et vérifie en particulier si les différences par rapport à l'instruction technique<sup>2</sup>, éventuellement accompagnées de dispositions compensatoires, restent acceptables.

<sup>1</sup> Sauf cas transitoires qui ne devraient plus exister pour les tunnels du réseau national.

<sup>2</sup> L'instruction technique du 25 août 2000 n'est strictement applicable qu'aux ouvrages nouveaux.

Les éléments tirés de l'ESD permettent :

- le cas échéant, de suggérer des améliorations de l'état de référence, voire même, de façon exceptionnelle, de remettre en cause les options prises ;
- dans tous les cas, de disposer d'éléments de base pour l'établissement par l'exploitant des consignes d'exploitation (et notamment les conditions minimales d'exploitation) et, en liaison avec les services de secours, des plans d'intervention et de sécurité (PIS)<sup>3</sup> (voir **fascicule 5**).

---

<sup>3</sup> La définition des conditions précises d'exploitation et d'intervention tire profit de l'ESD, mais n'en fait pas partie ; elle relève des documents d'exploitation (consignes, PIS, etc.).

# Partie A - Le rôle de l'étude spécifique des dangers dans le dossier de sécurité

## Recommandations aux maîtres d'ouvrage et aux exploitants

La réalisation de l'ESD est en général sous-traitée à des bureaux d'études spécialisés dans le domaine des études des dangers.

Le maître d'ouvrage et l'exploitant doivent cependant être très impliqués dans la démarche pour que celle-ci produise tous ses fruits.

### 3.1. Le maître d'ouvrage et l'exploitant doivent s'impliquer fortement

Le maître d'ouvrage (et l'exploitant dans le cas d'un tunnel à mettre en service ou d'un tunnel en exploitation) doit s'impliquer fortement dans la démarche :

- pour s'assurer que toutes les spécificités du contexte local sont bien prises en compte dans l'identification des dangers, ainsi que dans le choix des scénarios pertinents et leur analyse (par exemple : circulation d'autocars liée à une activité touristique ponctuelle ou dans le cas d'une route montagneuse isolée, délais d'arrivée des secours très supérieurs à ceux communément rencontrés, etc.);
- pour assurer une bonne coordination avec les autres acteurs concernés (services d'incendie et de secours, services de police, S.a.m.u. ou équivalent, etc.) qui doivent notamment être associés aux différentes étapes de l'étude.

Des points d'arrêts sont nécessaires tout au long de l'élaboration de l'ESD.

Pour un tunnel en exploitation, 4 réunions au minimum sont nécessaires :

- réunion de présentation de l'état de référence adopté par le maître d'ouvrage (établi au préalable en liaison avec les autres acteurs, pompiers, forces de police, etc.);
- réunion de validation des chapitres 1 et 2 et de définition du choix des scénarios, au cours de l'élaboration du chapitre 3;
- réunion de présentation du déroulement des scénarios au cours de l'élaboration du chapitre 4;
- réunion de synthèse à la fin de l'ESD.

Pour un tunnel au stade du POA, le nombre de réunions pourra être réduit.

Selon la complexité de l'ouvrage, d'autres réunions peuvent être nécessaires.

La durée totale de réalisation d'une ESD est de 2 à 6 mois suivant la complexité de l'ouvrage. Ce délai pourra être supérieur dans des cas particuliers.



### 3.2. Il ne doit pas y avoir d'ambiguïté sur les caractéristiques de l'état de référence pris en compte

L'état de référence et les données de trafic, y compris le régime de passage des marchandises dangereuses, sont des données indispensables à l'ESD.

Comme déjà indiqué dans le chapitre 2, l'ESD prend en considération le tunnel (dispositions techniques et organisationnelles) dans son **état de référence**. Cet état doit être défini avec précision au moment du lancement de l'ESD. Si l'ESD conduit à apporter des améliorations à l'état de référence, deux situations sont possibles :

- ou bien ces améliorations ne remettent pas sensiblement en cause l'identification des dangers ni le choix et le déroulement des scénarios : l'ESD reste fondée sur l'état de référence initial, clairement décrit, et comporte dans ses conclusions les propositions d'amélioration envisagées ; celles-ci sont ensuite reprises à son compte (ou non) par le maître d'ouvrage dans son rapport qui conclut le dossier de sécurité ;
- ou bien ces améliorations remettent sérieusement en cause l'état de référence ; dans ce cas, un nouvel état de référence est validé par le maître d'ouvrage et sert de base à l'ESD telle qu'elle est finalement présentée.

Dans tous les cas, dans le document final de l'ESD, les résultats et conclusions doivent s'appliquer au tunnel supposé dans un état bien déterminé, l'état de référence.

La connaissance du **trafic** est indispensable pour l'appréciation des conditions de sécurité puisque les véhicules et les usagers sont à la fois les causes et les victimes d'incidents et d'accidents. La progression des équipes d'intervention et de secours vers le tunnel et à l'intérieur dépend, elle aussi, des conditions de trafic. On se reportera au **fascicule 1** « Modalités d'élaboration du dossier de sécurité » pour obtenir des précisions sur le contenu des études de trafic.

L'ESD prend en compte les choix faits dans une étape antérieure en ce qui concerne le passage des véhicules transportant des **marchandises dangereuses** (TMD). Le lecteur se reportera au **fascicule 3** « Les études des risques liés au transport des marchandises dangereuses ».

### 3.3. Les outils de modélisation doivent être utilisés avec discernement

L'objectif de vérification et d'amélioration de la sécurité ne doit pas disparaître derrière les outils de modélisation.

L'ESD fait appel en général à des modélisations du mouvement des fumées et du comportement des usagers.

Toutes les modélisations ont une part d'incertitude, mais plus encore dans le cas des tunnels car les phénomènes de propagation des fumées sont très sensibles à de faibles variations de nombreux paramètres et les comportements des usagers, souvent imprévisibles, ont une influence prépondérante.

Si une meilleure connaissance de la propagation des fumées peut suggérer des dispositions d'exploitation et d'intervention plus efficaces et si les adaptations correspondantes peuvent effectivement être réalisées, alors les outils de modélisation trouvent toute leur utilité.

A l'inverse, pour les tunnels dont les équipements sont d'une telle simplicité que les fonctionnalités sont évidentes et où un haut degré de surveillance ne pourra jamais être mis en place, les modélisations sophistiquées ont peu d'utilité pour orienter vers des modifications du système ou aider à l'exploiter.

### **3.4. L'ESD doit être un document pédagogique «fondateur»**

Qu'il s'agisse d'un tunnel nouveau ou d'un tunnel en exploitation, le premier passage du dossier de sécurité devant le comité d'évaluation est un temps fort de la démarche de sécurité de l'ouvrage. L'ESD réalisée à cette occasion a un caractère «fondateur» de la sécurité de l'ouvrage.

Pendant toute la vie de l'ouvrage, le retour d'expérience et les exercices annuels enrichissent la réflexion des exploitants et des intervenants extérieurs. L'exploitant doit ainsi mettre à jour aussi souvent que nécessaire certains éléments du dossier de sécurité, notamment le PIS.

L'ESD, elle, est un document à caractère permanent, du moins en l'absence de modifications substantielles de l'ouvrage, de son environnement, de son trafic et de son exploitation, justifiant un nouvel examen du dossier par le CESTR. Elle n'est pas destinée à rester dans un tiroir; bien au contraire elle est un document à valeur pédagogique, qui doit être lu et pouvoir être compris par toute personne ayant une responsabilité en matière de sécurité dans le tunnel (y compris et surtout les nouveaux arrivants).

#### **Notes**

---

---

---

---

---

---

---

## Partie B - Méthodologie et contenu de l'ESD

Chacun des cinq chapitres de la partie B donne des recommandations pour l'établissement du même chapitre de l'étude spécifique des dangers.

Les chapitres 1 et 2 décrivent le tunnel, son environnement et ses fonctionnalités dans l'état de référence.

### Présentation du tunnel et de son environnement

Le tunnel est déjà présenté dans d'autres pièces du dossier de sécurité. Ce chapitre de l'ESD doit insister sur ce qui est important vis-à-vis de la sécurité, quitte à renvoyer à d'autres pièces. On s'intéressera notamment aux aspects suivants :

- caractéristiques du tunnel;
- situation des centres d'exploitation et de secours par rapport au tunnel;
- environnement naturel (géologie, hydrogéologie, météorologie, etc.);
- environnement humain (populations et activités présentes à proximité, en permanence ou de manière temporaire);
- environnement routier: principaux itinéraires, avec leurs conditions générales de circulation;
- composition du trafic;
- etc.

## Partie B - Méthodologie et contenu de l'ESD

### Description fonctionnelle du tunnel

Ce chapitre de l'ESD décrit les fonctions de sécurité assurées, en indiquant quels sont les principaux dispositifs de génie civil, les équipements et les dispositions d'exploitation qui concourent à chacune d'entre elles.

Cette description doit être fonctionnelle au sens des fonctions de sécurité, mais ne doit pas aller jusqu'à une analyse de la sûreté de fonctionnement. Le niveau d'analyse à adopter dans cette description est le même que celui de l'annexe 1 du **fascicule 2**<sup>4</sup>.

Une fiche analysant la conformité par rapport à l'instruction technique annexée à la circulaire n° 2000-63 peut être utile, en particulier pour les tunnels existants.

---

<sup>4</sup> Dans le fascicule 2, les exemples de description fonctionnelle se rapportent à l'«état des lieux» dans lequel se trouve le tunnel avant réalisation de la mise à niveau de la sécurité. Ici, il s'agit de l'état de référence qui peut être identique ou différent suivant les fonctions considérées et les modifications envisagées.

## Partie B - Méthodologie et contenu de l'ESD

### Identification des dangers et choix des scénarios

Cette étape de l'étude doit être menée en concertation étroite avec les différents intervenants concernés: maître d'ouvrage, exploitant, services de police et de secours.

Cette étape répond successivement à deux objectifs différents:

- la prise en compte **la plus exhaustive possible** des événements susceptibles de survenir: c'est à la fois un préalable à la sélection des scénarios et un élément fondamental pour la mise au point des documents d'exploitation et notamment du plan d'intervention et de sécurité (PIS) décrit dans le **fascicule 5**;
- la sélection d'un **petit nombre** de scénarios destinés à être analysés de façon détaillée (voir chapitre B.4).

#### 3.1. Définitions

On adoptera dans la suite du texte les définitions suivantes:

- les **situations accidentogènes** (vitesse excessive, véhicule arrêté sur la chaussée, etc.) sont les situations qui, sans pour autant créer un danger immédiat, sont de nature à augmenter la probabilité d'occurrence d'un événement déclenchant ou de plusieurs événements déclenchants en chaîne;
- les **événements déclenchants** sont les événements qui marquent le début d'une situation de danger grave et avéré pour les usagers (accident, incendie, etc.); ces événements déclenchants sont les points de départ des scénarios;
- les **éléments aggravants** sont les éléments de contexte qui sont de nature à aggraver les conséquences d'un événement déclenchant (dysfonctionnement de la ventilation du tunnel, mauvaises conditions météo, sur-accident en fin de file de véhicules, etc.);
- 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.

#### 3.2. Identification des dangers

Pour aider à l'identification des dangers, on trouvera en **annexe A** une liste guide des événements dangereux en tunnel. **Cette liste doit être adaptée aux spécificités du tunnel étudié et à son environnement.** On pourra également utiliser une méthode d'analyse du type de celles utilisées dans la sécurité industrielle; dans ce cas on veillera plus encore à ne pas oublier les spécificités des tunnels (comportement des usagers, mouvement des fumées, etc.).

Certains dysfonctionnements du tunnel ne sont pas à considérer quand ils doivent conduire à titre préventif à la fermeture immédiate du tunnel (perte de la gestion technique centralisée, panne d'électricité grave, panne d'éclairage, etc.). En revanche, quand on ne peut pas exclure que la perte d'un équipement passe inaperçue ou quand elle peut être causée par un événement déclenchant (par exemple, perte due à un court circuit causé par l'incendie), cette perte est à considérer comme un élément aggravant.

### 3.3. Choix des événements déclenchants

Le choix des scénarios à analyser dans le chapitre 4 commence par le choix des événements déclenchants (rarement plus de trois ou quatre).

Les événements déclenchants standardisés<sup>5</sup> qu'il est conseillé de choisir sont, selon le règlement de circulation applicable au tunnel :

1. tunnel autorisé aux PL hors TMD
  - a. incendie de PL
  - b. incendie de PL avec chargement liquide ou facilement liquéfiable à haut potentiel calorifique
2. tunnel autorisé aux PL avec TMD
  - a. incendie de PL
  - b. incendie d'un PL TMD (citerne de 20 tonnes de carburant)
3. tunnel de gabarit compris entre 2 m et 3,5 m
  - a. incendie de fourgon avec chargement de liquide inflammable, sans épandage
  - b. incendie de petit PL
4. tunnel de gabarit inférieur à 2 m
  - a. incendie de VL avec propagation à un ou deux autres VL
  - b. incendie de fourgon avec chargement de liquide inflammable, sans épandage.

En plus de ces événements standardisés, on pourra introduire d'autres événements si une particularité du tunnel étudié le justifie (conditions atmosphériques, fortes déclivités, temps d'accès des services de secours, environnement urbain autoroutier très saturé...).

Si l'évaluation des risques liés aux TMD (voir **fascicule 3**) met en évidence que des marchandises dangereuses autres que les hydrocarbures liquides contribuent de manière importante au risque TMD, on examinera l'opportunité de prendre en compte des événements déclenchants mettant en jeu ces marchandises.

<sup>5</sup> Le chapitre 4 donne des éléments quantitatifs pour standardiser la modélisation de ces événements et de leurs conséquences.

Pour choisir les événements déclenchants, on peut utiliser une représentation du type «matrice fréquence-gravité» mettant en relation la probabilité d'occurrence des événements déclenchants et leurs conséquences présumées. Cet outil et ses limites sont présentés en **annexe B**.

### 3.4. Choix des scénarios associés aux événements déclenchants

La définition des scénarios consiste, après avoir choisi, dans la liste des dangers identifiés, des événements déclenchants (dont les événements standardisés), à les associer à un contexte. Par exemple, on pourra associer à l'événement déclenchant «incendie de PL» le contexte suivant: «cet incendie se déclenche au PM 650 à 18 h 30 dans des conditions météorologiques défavorables en situation de trafic congestionné, etc.».

Il faut éviter de multiplier les contextes étudiés, mais à partir des quelques scénarios retenus, des variantes peuvent ensuite être éventuellement étudiées afin de tester la sensibilité des conséquences à un paramètre qui s'est révélé particulièrement influent.

Les choix doivent être opérés avec discernement. On s'attachera notamment à ne pas viser systématiquement le contexte le plus défavorable qui pourrait conduire à masquer l'intérêt de mesures spécifiquement retenues pour améliorer la sécurité: incendie survenant au droit d'une issue de secours à créer dans un tunnel en exploitation et rendant celle-ci inaccessible par exemple.

Ce n'est pas ici l'exhaustivité qui est visée, mais le caractère instructif des scénarios, c'est-à-dire leur aptitude à faire comprendre l'articulation entre les équipements et les dispositions d'exploitation et d'intervention permettant de répondre aux fonctions de sécurité. On peut par exemple choisir un scénario qui mobilise tous les intervenants pour tester les points faibles de leur coordination. À ce titre, les scénarios complètent l'identification des dangers, pour aider à la rédaction des consignes d'exploitation et du PIS et à la définition d'exercices périodiques.

La durée des scénarios est en règle générale à limiter aux seules 30 premières minutes, les plus cruciales pour déterminer les conséquences sur la sécurité des usagers<sup>6</sup>.

Face à certains scénarios extrêmes (par exemple explosion à la suite d'un accident ou d'un incendie impliquant une citerne de GPL), on ne peut que constater des conséquences quasi inéluctables (mort de l'ensemble des personnes présentes dans le tunnel), compte tenu de la rapidité du phénomène. Les actions possibles sont exclusivement du domaine de la prévention (restrictions de circulation, de construction au dessus du tunnel, etc.). L'étude détaillée d'un tel scénario n'apprend rien de directement utile. En revanche, un scénario de fuite de gaz toxique appelle des réactions qui peuvent être précisées par l'analyse. Selon le trafic qui emprunte le tunnel, un scénario de ce type peut donc être à considérer.

<sup>6</sup> Le temps nécessaire à l'évacuation de personnes réfugiées dans des abris peut obliger à prolonger cette durée.

# Partie B - Méthodologie et contenu de l'ESD

## Étude des scénarios

### 4.1. Déroulement d'un scénario

Il s'agit, en décrivant l'enchaînement des événements et des actions à mener, de montrer la contribution de chaque facteur matériel et organisationnel participant à la sécurité du tunnel et la façon dont ils interagissent.

Les résultats chiffrés des éventuels modèles doivent être considérés avec précaution en raison des nombreuses incertitudes qui entachent toute simulation.

Chaque scénario commence par un événement déclenchant et se poursuit par la chronologie des événements jusqu'à la mise en sécurité des usagers, ou l'arrivée des services de secours si celle-ci est postérieure.

Ces événements découlent :

- du développement de phénomènes en milieu confiné (propagation de fumées, liquides, gaz et chaleur à l'intérieur du tunnel sous l'effet des conditions géométriques, mécaniques et aérodynamiques, ainsi que des caractéristiques et des déplacements des véhicules);
- du comportement des usagers (notamment déplacements à pied vers les issues de secours);
- de la mise en œuvre des dispositifs et procédures de sécurité (systèmes de détection, déclenchement et fonctionnement des équipements, réactions de l'exploitant, intervention des services de secours, etc.).

L'étude des scénarios doit permettre :

- de montrer de façon concrète le rôle de chaque dispositif ou procédure dans la limitation des effets mettant en péril les usagers du tunnel;
- de mettre en évidence les interactions entre ces différents dispositifs ou procédures;
- d'identifier les faiblesses de chacun individuellement ainsi que du fonctionnement d'ensemble;
- de déterminer l'existence de zones plus ou moins dangereuses, tant au niveau du tunnel que de l'environnement (opacité, gaz toxiques, température, surpressions, projectiles, etc.) et d'évaluer le nombre de personnes susceptibles d'être présentes et exposées<sup>7</sup>.

<sup>7</sup> Même quand elle est effectuée avec l'aide de modèles, l'évaluation des zones à risques et de leur évolution est entachée de larges incertitudes dans l'analyse des résultats. À ce titre, la détermination d'un «nombre de morts par scénario» doit être fortement relativisée, car de tels chiffres reposent nécessairement sur des bases fragiles.



Le fait qu'un événement déclenchant conseillé corresponde à l'incendie de dimensionnement ou à un incendie de puissance encore supérieure n'a pas pour objet de vérifier ou remettre en cause ce dimensionnement, mais de permettre de valider les dispositions d'exploitation et le fonctionnement de l'ensemble du système défini par l'état de référence ou de suggérer leur adaptation.

## 4.2. Éléments standardisés pour l'étude des scénarios

Autant les spécificités de chaque tunnel doivent être prises en compte de façon détaillée, autant une réflexion au cas par cas ne se justifie pas pour préciser les valeurs des éléments sur lesquels le responsable du tunnel a très peu de moyens d'action. C'est pourquoi un certain nombre d'éléments qui ont une influence déterminante ont été standardisés<sup>8</sup>.

Les éléments qui ont donc été **standardisés** sont :

- les «termes sources d'incendie», c'est-à-dire les quantités de chaleur, de fumées et de gaz toxiques émises par un incendie en fonction du temps, selon le type de véhicule dont l'incendie est retenu comme événement déclenchant ;
- les critères de survie en atmosphère enfumée ;
- le comportement des usagers (tant dans la formation des bouchons de véhicules que quand ils quittent leur véhicule pour rejoindre à pied les issues de secours).

Les valeurs standardisées doivent être adoptées. Mais s'il apparaît exceptionnellement qu'elles sont mises en défaut dans un tunnel considéré, il sera possible de retenir des scénarios complémentaires utilisant d'autres valeurs.

### 4.2.1. Termes sources d'incendie standardisés

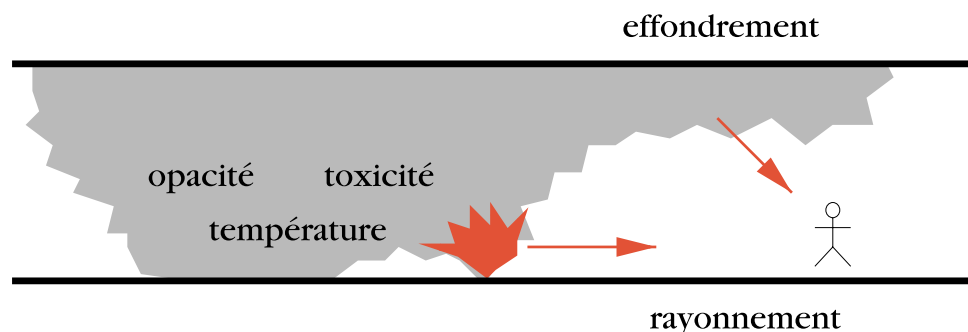
Les termes sources d'incendie standardisés sont donnés en **annexe C** pour chacun des événements déclenchants standardisés du paragraphe 3.3.

### 4.2.2. Zones à risques

Comme indiqué sur le schéma de principe ci-dessous, les zones à risques générées par un incendie en tunnel dépendent de l'état de stratification des fumées, des niveaux d'opacité, de toxicité et de température rencontrés par les usagers, de la quantité de chaleur rayonnée reçue par les usagers<sup>9</sup>.

<sup>8</sup> Ceci permet, en outre, d'effectuer des comparaisons entre ESD de différents tunnels grâce à l'absence de disparité des hypothèses.

<sup>9</sup> Le risque d'effondrement de la structure à des températures qui permettent la survie est quasi-inexistant : le dimensionnement du génie civil est en effet tel que les conditions à l'intérieur du tunnel seront devenues invivables bien avant l'effondrement éventuel du plafond ou de la voûte.



**Facteurs de risques liés à un incendie en tunnel**  
(moitié gauche : zone destratifiée ; moitié droite : zone stratifiée)

À gauche sur la figure, les fumées sont destratifiées et occupent toute la section. Leur opacité gêne alors le déplacement des usagers. Ces derniers sont affectés par la toxicité et la température des fumées. Le temps qu'ils passent dans cet environnement avant de rejoindre une issue de secours et le degré d'agressivité de cet environnement déterminent alors les conséquences. On considère qu'un taux de monoxyde de carbone (CO) supérieur à 3 000 ppm ou une température supérieure à 80°C ne permettent pas à un usager de cheminer plus d'un quart d'heure environ<sup>10</sup>.

À droite sur la figure, les fumées sont stratifiées. Les conditions de visibilité et de toxicité sont en général supportables par les usagers qui sont en revanche affectés par le rayonnement (symbolisé par des flèches rouges sur la figure)<sup>11</sup>. Un rayonnement de 2 kW/m<sup>2</sup> est le maximum supportable par un usager pendant quelques minutes<sup>12</sup>.

#### 4.2.3. Comportement des usagers

On trouvera en **annexe E** la standardisation des comportements d'usagers :

- pour la formation des bouchons ;
- pour les vitesses de fuite vers les issues de secours selon les conditions régnant dans le tunnel.

Ces éléments sont bien sûr simplifiés et approximatifs, mais ils sont représentatifs d'un comportement moyen. Leur mise en défaut ne pourrait résulter que d'actions extrêmement lourdes d'éducation et de formation des usagers.

<sup>10</sup> Dans le cas général, la toxicité d'un incendie est mesurée par le taux de CO. Dans les tunnels présentant des trafics susceptibles de générer des dégagements de gaz toxiques particuliers, on se reportera aux valeurs de toxicité indiquées sur le site internet de l'Ineris, <http://www.ineris.fr>.

<sup>11</sup> On peut se protéger du rayonnement émis par le foyer de l'incendie en s'abritant derrière un obstacle (typiquement un véhicule). C'est donc le rayonnement émis par la couche de fumées chaudes au plafond qui pose le plus problème. Le temps passé sous la couche de fumées par les usagers durant leur évacuation et la température des fumées déterminent les conséquences.

<sup>12</sup> 5kW/m<sup>2</sup> pour les pompiers équipés.

### 4.3. Représentation du mouvement des fumées

Lors de l'étude d'un scénario incendie, la description des zones à risques nécessite d'avoir une assez bonne idée de l'évolution de l'environnement thermique et surtout du mouvement des fumées dans le tunnel au cours des 15 à 30 premières minutes qui suivent le début de l'incendie.

Selon les types de tunnel, l'utilisation de la ventilation de désenfumage pour maintenir des conditions de survie et de visibilité se fait suivant plusieurs stratégies (voir le fascicule *ventilation* du dossier pilote des tunnels, disponible prochainement au Cetu):

- en poussant les fumées dans le sens de la circulation; ainsi, les usagers bloqués derrière l'incendie peuvent se diriger à pied vers les issues de secours. Dans ce cas, il faut que les usagers situés du côté vers lequel on pousse les fumées puissent s'échapper librement en véhicule avant que la partie du tunnel dans laquelle ils se trouvent ne soit envahie par les fumées. Cette stratégie de désenfumage n'est applicable que pour les tunnels à trafic unidirectionnel non congestionné (ventilés longitudinalement);
- dans tous les autres cas (ventilation transversale, ventilation longitudinale avec extraction massive, ventilation longitudinale mise en œuvre en deux temps), on vise dans un premier temps à limiter la vitesse du courant d'air de façon à maintenir la stratification des fumées; on permet ainsi aux usagers bloqués par l'incendie d'évacuer à pied vers les issues de secours, le cas échéant sous une couche de fumée située en voûte.

On peut envisager 3 niveaux de complexité dans les modèles permettant la description du mouvement des fumées:

- niveau I: analyse «qualitative» (analyse pratiquée sans utilisation de logiciel de modélisation spécifique, mais faisant appel si nécessaire à des courbes, abaques ou équations);
- niveau II: analyse qualitative + modèle monodimensionnel<sup>13</sup>;
- niveau III: analyse qualitative + modèle monodimensionnel + modèle tridimensionnel.

Dans la grande majorité des cas, le maître d'ouvrage retiendra le niveau II.

Pour les tunnels possédant une géométrie peu courante (quatre voies de circulation ou plus, hauteur sous voûte supérieure à 7 à 10 mètres, échangeur souterrain complexe, etc.) une modélisation de niveau III peut être utile. Dans ce cas le maître d'ouvrage peut avoir besoin de faire procéder à une analyse préliminaire afin de préciser le niveau qu'il demandera dans l'appel d'offres. Pour plus d'informations on se reportera à l'**annexe D** qui rappelle également les précautions habituelles pour l'emploi de ce type de modèle.

<sup>13</sup> Font aussi partie du niveau II les modèles de zones adaptés aux tunnels.

# Partie B - Méthodologie et contenu de l'ESD

## Synthèse

Ce chapitre de l'ESD doit comporter sous une forme concise :

1. la synthèse des scénarios étudiés et de leurs conséquences;
2. la récapitulation des observations faites au cours des chapitres 3 et 4 sur les mesures de sécurité et les éventuelles propositions d'amélioration:
  - adéquation par rapport aux règles de l'art des mesures destinées à réduire la probabilité d'occurrence des accidents,
  - pour un tunnel en service non conforme à l'instruction technique, appréciation du niveau de sécurité par rapport à celui qui résulterait de l'application stricte de celle-ci,
  - cohérence des moyens visant à limiter l'occurrence et les conséquences des accidents,
  - adéquation des dispositions prises pour limiter les conséquences des défaillances d'équipements et absence de mode commun de défaillance pour ceux qui sont importants pour la sécurité,
  - le cas échéant, propositions d'amélioration des dispositions retenues;
3. la synthèse des éléments utiles à l'établissement:
  - des consignes d'exploitation (notamment les cas d'indisponibilité d'équipements ou de personnels qui sont compatibles ou non avec le maintien de la circulation dans le tunnel),
  - du plan d'intervention et de sécurité,
  - des plans d'intervention des services publics de secours.

### Notes

---

---

---

---

---

---

---

# Annexes

- Annexe A** ■ **Liste guide pour l'identification des dangers**  
A.1 à A.4
- Annexe B** ■ **Éléments pour l'appréciation des risques d'accidents et d'incendies**  
B.1 à B.4
- Annexe C** ■ **Standardisation des termes sources d'incendie et MD**  
C.1 à C.12
- Annexe D** ■ **Spécifications pour la modélisation du mouvement des fumées**  
D.1 à D.8
- Annexe E** ■ **Modélisation du comportement des usagers**  
E.1 à E.2



# Liste guide pour l'identification des dangers

Il existe de multiples façons de classifier les situations de dangers. Dans un souci de simplification, nous proposons ci-après une liste guide fondée sur les trois familles de dangers définies en partie B, paragraphe 3.1. Le lecteur pourra faire appel à d'autres méthodes s'il le souhaite.

## A.1. Situations accidentogènes

### A.1.1. Dangers liés aux usagers

- Vitesse excessive;
- Usagers en forte affluence (bouchon);
- Usagers ne respectant pas l'interdistance entre véhicules;
- Non-respect de la voie d'affectation;
- Conduite dangereuse (freinage brutal, dérapage);
- Panne ou arrêt d'un VL;
- Panne ou arrêt d'un deux-roues;
- Panne ou arrêt d'un PL;
- Panne ou arrêt d'un autocar;
- Usagers circulant à contre sens;
- Convoi de véhicules pour manifestation;
- Intrusion d'un véhicule hors gabarit, convoi exceptionnel;
- Intrusion accidentelle ou volontaire d'un piéton;
- Manifestation de protestation;
- Intrusion accidentelle d'un animal sauvage ou domestique;
- Animal domestique s'échappant d'un véhicule;
- Etc.

### A.1.2. Dangers liés à l'environnement physique extérieur

- Inondation dans l'ouvrage;
- Brouillard (visibilité réduite aux entrées et sorties);
- Vent violent (mouvement incontrôlé, chute d'objets);
- Pluie soutenue (visibilité réduite aux entrées et sorties, film d'eau sur chaussée);
- Neige (chaussée enneigée aux têtes de tunnel, chaussée glissante);
- Verglas (chaussée glissante en entrée et sortie de tunnel);
- Infiltration d'eau en tunnel;
- Dégagement de fumée provoqué par un incendie extérieur au tunnel (forêt, décharge, etc.);
- Etc.

### **A.1.3. Dangers liés aux infrastructures du tunnel et au dysfonctionnement des équipements de sécurité**

- Pente/Rampe forte, changement de rayon du tracé en plan;
- Vétusté et absence de maintenance de certains équipements;
- Encombrement de la BAU;
- Flaque d'huile ou usure de la chaussée (perte d'adhérence);
- Etc.

### **A.1.4. Dangers liés aux intervenants (internes et externes)**

- Défaut d'organisation de l'exploitation;
- Absence de formation du personnel;
- Absence de mise en place de mesures particulières alors que les conditions minimales d'exploitation ne sont plus respectées.

## **A.2. Événements déclenchants**

### **A.2.1. Dangers liés aux usagers**

- Malaise d'un usager en transit;
- Chute du chargement (partielle ou totale);
- Perte de remorque;
- Accident sans blessé d'un VL;
- Accident sans blessé d'un deux-roues;
- Accident sans blessé d'un PL;
- Accident sans blessé d'un autocar;
- Accident avec blessé(s) d'un VL;
- Accident avec blessé(s) d'un deux-roues;
- Accident avec blessé(s) d'un PL;
- Accident avec blessé(s) d'un autocar;
- Accident d'un PL transportant des marchandises dangereuses;
- Incendie sans blessé d'un VL;
- Incendie sans blessé d'un PL;
- Incendie sans blessé d'un PL transportant des MD;
- Incendie sans blessé d'un autocar;
- Incendie avec blessé d'un VL;
- Incendie avec blessé d'un PL;
- Incendie avec blessé d'un PL transportant des MD;
- Incendie avec blessé d'un autocar;
- Voiture piégée (explosifs à bord);



- Malveillance (action volontaire à but destructif);
- Vandalisme (action spontanée);
- Acte de terrorisme;
- Chute d'un piéton sur chaussée (accident ou suicide);
- Jet d'objet aux têtes;
- Etc.

### **A.2.2. Dangers liés à l'environnement physique extérieur**

- Avalanche aux têtes;
- Chute de pierres ou effondrement aux têtes;
- Séisme;
- Température trop élevée (échauffement des véhicules, équipements...);
- Etc.

### **A.2.3. Dangers liés aux infrastructures du tunnel et au dysfonctionnement des équipements de sécurité**

- Chute d'équipement lourd suspendu en voûte (accélérateur par exemple);
- Incendie sur installation dans le tunnel.

### **A.2.4. Dangers liés aux intervenants (internes et externes)**

- Fausse manœuvre de l'exploitant.

## **A.3. Éléments aggravants**

### **A.3.1. Dangers liés aux usagers**

- Non respect des consignes de sécurité en cas de panne d'accident ou d'incendie.

### **A.3.2. Dangers liés à l'environnement physique extérieur**

- Contre-pressions atmosphériques;
- Température trop basse (gel de la conduite incendie...);
- Industrie locale polluante;
- Site classé;
- Etc.

### **A.3.3. Dangers liés aux infrastructures du tunnel et au dysfonctionnement des équipements de sécurité**

- Encombrement du trottoir;
- Caniveaux (avaloirs) bouchés;
- Bassin de stockage plein ou à faible capacité;
- Issues de secours à faible capacité et interdistances importantes;
- Passage inter-tube débouchant directement sur la chaussée;
- Dysfonctionnement du système de ventilation;
- Dysfonctionnement des analyseurs de CO/NO, opacimètres, anémomètres;
- Prise d'air non protégée;
- Panne générale de l'alimentation électrique;
- Dysfonctionnement d'une station électrique;
- Dépassement du délai onduleur;
- Panne d'éclairage;
- Dysfonctionnement de la signalisation dynamique;
- Dysfonctionnement du système de fermeture du tunnel;
- Dysfonctionnement de la vidéosurveillance;
- Dysfonctionnement de la détection automatique d'incident;
- Dysfonctionnement du réseau d'appel d'urgence;
- Dysfonctionnement de la détection incendie;
- Dysfonctionnement du système de retransmission radio;
- Panne de la gestion technique centralisée;
- Vidange accidentelle du réservoir incendie;
- Rupture du réseau incendie;
- Etc.

### **A.3.4. Dangers liés aux intervenants (internes et externes)**

- Retard du pupitreur dans la détection de l'incident;
- Retard du pupitreur dans la validation de l'incident;
- Retard du pupitreur dans la fermeture de l'ouvrage;
- Retard du pupitreur dans le lancement de la ventilation;
- Retard du pupitreur dans la procédure d'alerte des secours;
- Perte de temps dans le délai d'arrivée des secours;
- Perte de temps dans la progression des secours en tunnel;
- Indisponibilité d'un véhicule d'intervention d'urgence en cas de besoin;
- Mauvaise communication radio sur le terrain;
- Mauvaise communication entre PC et terrain;
- Etc.

# Éléments pour l'appréciation des risques d'accidents et d'incendies

## B.1. Fréquence des incendies en tunnel

En ce qui concerne les pannes et les accidents matériels et corporels, il n'y a pas de différence significative entre trajets en tunnel et à l'air libre. On peut donc s'appuyer sur les résultats classiques obtenus sur l'ensemble du réseau, qui ne sont pas détaillés ici (différences entre routes et autoroutes, liens avec les déclivités, les courbes, etc.). Ces événements ont par ailleurs des conséquences également voisines du cas de l'air libre, à facilité d'accès des secours identiques (BAU, portail de service par exemple).

Il n'en est pas de même pour les incendies.

Les statistiques d'incendies en tunnel ne peuvent s'appuyer que sur un faible nombre d'occurrences, ce qui rend délicat leur usage dans des raisonnements probabilistes. Par ailleurs, les statistiques d'incendies sur l'ensemble du réseau routier sont incomplètes puisqu'elles ne sont pas recensées au titre de l'accidentologie routière (sauf s'il y a eu collision ou si l'incendie a été très important).

Le tableau ci-dessous donne les taux typiques d'incendies pour 100 millions de véhicules kilomètres, par nature de véhicule. Les taux choisis sont arrondis à des valeurs simples avec des rapports également simples entre eux.

	Minimum	Maximum	Cas hors normes
VL	2	2	2
PL et Autocars	1,5	4,5	13,5
<i>Dont non maîtrisés</i>	0,5	1,5	4,5
TMD	0,5	1,5	4,5
<i>Dont non maîtrisés</i>	0,2	0,6	1,8

Pour les VL les taux retenus ne dépendent pas de la nature du tunnel.

Pour les PL les taux dépendent beaucoup de la nature du tunnel. Le minimum est dans des tunnels autoroutiers et/ou urbains sans déclivités particulières d'accès; le maximum est sur les trajets autoroutiers assez éprouvants (fortes pentes et courbes) ou sur routes nationales, et les cas hors normes dans des tunnels avec trajets d'accès très éprouvants pour le véhicule.

Le taux à retenir pour un tunnel particulier est à fixer au cours de la réalisation de l'ESD en fonction des caractéristiques du tunnel et de son trajet d'accès.

Les incendies dits non maîtrisés sont ceux qui n'ont pu être éteints par les usagers eux-mêmes et qui peuvent conduire à une destruction complète du véhicule et de son chargement. Leur fréquence n'est connue que globalement, toutes puissances d'incendies confondues.

Parmi les incendies recensés ci-dessus, seule une petite proportion correspond à des incendies après collision. Les quelques données dont on dispose permettent de considérer que ces derniers représentent pour toutes les catégories de véhicules un incendie sur trente environ. Le tableau ci-dessous reprend les taux d'incendies après collision, exprimés pour 100 millions de véhicules kilomètres.

	Autoroutier	Routier
VL	0,07	0,2
PL-Autocars	0,05	0,15
TMD	0,02	0,06

Lors d'un incendie spontané, le conducteur a le réflexe d'essayer de sortir du tunnel. Pour un tunnel court, il y arrive en général. Il faut donc adapter les taux donnés ci-dessus au cas des tunnels courts non urbains (à risque de congestion faible). En supposant que, si l'incendie se produit à moins de 200 m de la sortie le véhicule ne s'arrêtera pas dans le tunnel, le facteur correctif est égal à  $(1 - (200/L))$ , où L est la longueur du tunnel en mètres. Ceci conduit par exemple à diviser le taux par trois pour un tunnel de 300 m, par deux pour un tunnel de 400 m.

Pour les incendies consécutifs à des collisions, aucune correction pour tunnel court n'est à faire<sup>1</sup>. La probabilité que la collision concerne plusieurs véhicules, ou qu'un incendie spontané s'étende à plusieurs véhicules, dépendra surtout du trafic et non de la longueur.

### Calcul de la fréquence d'occurrence d'incendies

Pour obtenir la fréquence annuelle d'incendies dans un tube on multiplie les taux (c'est-à-dire les valeurs données ci-dessus multipliées par  $10^{-8}$ ) par le nombre de véhicules kilomètres annuel ( $365 \times \text{TMJA}/\text{tube} \times L$ , où L est la longueur en km). Compte tenu de la dispersion des TMJA, des longueurs et des taux, on obtient alors des écarts de fréquence très importants entre différents tunnels (au moins de 1 à 0,001 pour les seuls incendies PL).

<sup>1</sup> On constate même que les accidents sont plus fréquents au début ou en fin d'un tunnel qu'en son milieu.

## B.2. L'usage de matrices gravité-occurrence

Afin de simplifier l'analyse et de la fonder sur des éléments quantitatifs, il peut être décidé de faire appel à une méthode de représentation des données de type matrice gravité-occurrence. Si ce choix est retenu, quelques éléments standardisés sont proposés ci-dessous.

### Classes de gravité

On peut classer les conséquences sur la sécurité des personnes dans le tunnel et dans son environnement dans 5 classes de gravité (en blessés/intoxiqués légers ou graves, décès). On trouvera ces classes dans le tableau ci-dessous :

Gravité	
I « Mineur ou nul »	Dégâts matériels
II « Significatif »	Blessés légers
III « Critique »	Blessés graves ou < 5 morts
IV « Catastrophique »	> 5 morts, < 50 morts
V « Catastrophe majeure »	> 50 morts

Les dégâts matériels au tunnel, la gêne au trafic occasionnée par sa remise en état, les destructions de véhicules, ne sont pas inclus dans l'analyse de l'ESD.

### Classes de fréquence

On utilisera 6 classes de fréquence d'occurrence (de A à F) présentées dans le tableau ci-après. Les dénominations « fréquent », « rare »..., utilisées renvoient à une hiérarchie propre à la famille des événements en tunnel et non à une échelle absolue.

Les divers événements liés au TMD, hors incendies, se trouveront également en général regroupés en une seule classe (F le plus souvent). L'analyse plus détaillée de leur fréquence est faite par ailleurs dans le modèle EQR (pour plus de précisions voir fascicule 3).

La matrice résultant des classes de gravité et de fréquence précédentes est présentée ci-dessous.

	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					

**On ne cherchera pas à construire un indice quantitatif global de criticité**, croisant classes de fréquences et de gravité, l'attribution d'un poids chiffré à chaque classe (A, B, ..., I, II,...) étant arbitraire.

L'analyse par matrice gravité-occurrence est faite au stade de l'identification des dangers et donc avant l'étude des scénarios. La détermination précise de la classe de gravité d'un événement déclenchant est donc impossible. Par ailleurs, ce n'est pas l'objet de l'étude des scénarios, qui ne concerne qu'un tout petit nombre de cas, de préciser les classes de gravité. Les matrices ne doivent être utilisées que pour un simple débroussaillage aidant au choix des événements déclenchants retenus comme départs de scénarios.

#### Notes

---

---

---

---

---

---

---

# Standardisation des termes sources d'incendie et MD

Dans l'instruction technique du 25 août 2000, les termes sources d'incendie sont exprimés en niveaux de puissance d'incendie (en MW). Le groupe de travail a retenu pour les véhicules routiers le principe de définir les approches temporelles énergétiques et chimiques de termes sources standardisés de puissances 8 MW, 15 MW, 30 MW, 100 MW et 200 MW, considérés comme plausibles.

## C.1. Hypothèses globales

### C.1.1. Développement de l'incendie

Le développement de l'incendie est choisi rapide (hypothèse majorante pour éprouver la robustesse des équipements et de l'organisation et les possibilités d'évacuation des usagers).

Par simplification, deux formes de développement temporel ont été adoptées:

- triangle: la plupart des feux isolés (sans propagation) sont dans ce cas;
- trapèze: ce type de feu peut se développer dans les cas suivants:
  - feu d'un véhicule avec propagation plus ou moins rapide à d'autres véhicules,
  - incendie d'un véhicule dans lequel le chargement participe pour une part majoritaire et impose en quelque sorte sa vitesse de combustion et la puissance afférente,
  - incendie développé en sous-ventilation (la puissance est limitée par l'arrivée d'air).

### C.1.2. Choix des termes sources

La réflexion a porté sur la cohérence des critères suivants: potentiel calorifique, durée d'incendie et vitesses de combustion. Plus particulièrement dans le cas des chargements des poids lourds, il semble délicat d'imaginer que l'incendie de produits liquides ou facilement liquéfiables (hors TMD) sera contenu sur la plate-forme de la remorque sans épandage.

Les incendies de véhicules légers ont fait aujourd'hui l'objet de programmes d'essais [3] alors que les incendies de véhicules lourds sont beaucoup moins bien connus. Des termes sources afférents aux poids lourds pourront ainsi être affinés dans le futur tant dans la situation de l'incendie d'un véhicule isolé que dans celle d'une propagation d'un véhicule lourd à un autre, situation non examinée ici.

Les termes sources correspondant à un incendie d'autocar n'ont pas été développés, faute d'informations actualisées sur les potentiels calorifiques à prendre en compte.

## C.2. Termes sources standardisés pour les ESD

Le tableau ci-après décline les termes sources standardisés préconisés dans la réalisation d'ESD sous l'aspect énergétique.

$P_{\max}$ (MW)	$t_m$ (min)	$t_{\max}$ (min)	$t_d$ (min)	Débit d'air nécessaire pour $P_{\max}$ ( $m^3/s$ )	Énergie dégagée (MJ)	N° figures
8	5	25	20	4,8	18 000	3 et 4
15	5	60	15	9	63 000	8
30	5	0	45	18	50 000	9
30	10	50	30	18	125 000	10
100	10	60	20	60	450 000	12
200	10	60	30	120	960 000	13

Les figures donnant les courbes de puissance sont regroupées *in fine*.

On donne également les principaux critères affectant les effets chimiques :

Consommation d'oxygène: 1 kg de  $O_2$  pour 13,1 MJ

Production de  $CO_2$ : 0,1 kg/s de  $CO_2$  pour 1 MW

Production de CO:  $[CO_2] / [CO] = 25$  pour les incendies bien ventilés  
 $[CO_2] / [CO] = 5$  pour les incendies mal ventilés.

Le cas échéant une étude particulière de la production d'autres toxiques pourra être réalisée.

### C.2.1. Aspects énergétiques

Les potentiels calorifiques des différents véhicules (et de leur chargement éventuel) pris en compte ont été actualisés. La combustion est supposée complète.

#### C.2.1.1. Termes sources mettant en jeu un ou plusieurs véhicules légers

*Véhicules de tourisme isolés*

a. VL de type «petite» avec un potentiel calorifique 6 000 MJ [3]. Ils seront appelés petits VL par la suite (cf. Figure 1);

b. VL de type «routière» et «grand monospace»; potentiel calorifique: 12 000 MJ [3]. Ils seront appelés grands VL par la suite (cf. Figure 2).

*Véhicules de tourisme avec propagation, terme source standardisé 8 MW*

a. 1 petit VL et propagation à 2 petits VL à  $t_0 + 5$  min et  $t_0 + 15$  min (cf. Figure 3);

b. 1 grand VL et propagation à 1 petit VL à  $t_0 + 10$  min (cf. Figure 4).



Dans les deux cas le potentiel calorifique est de 18 000 MJ et la puissance de l'incendie est de l'ordre de 8 MW.

#### *Véhicules de tourisme avec propagation*

Deux cas sont étudiés qui prennent en compte d'abord l'incendie d'un grand VL qui se propage à un autre grand VL ( $t_0 + 5$  min) puis à un petit VL ( $t_0 + 10$  min ou  $t_0 + 15$  min). On constate cette fois que la puissance maximale est de 15 MW (cf. Figures 5 et 6).

#### **C.2.1.2. Termes sources mettant en jeu un fourgon chargé**

Le fourgon est supposé chargé (1 200 kg – surface de chargement 6 m<sup>2</sup>). Deux cas sont évalués:

##### *a. Chargement aéré de produits cellulosiques*

Potentiel calorifique 33 000 MJ (9 000 MJ pour le véhicule et 24 000 MJ pour le chargement). Le chargement aéré conduit à une vitesse de combustion élevée (~ 120 g/m<sup>2</sup>.s) (cf. Figure 7).

##### *b. Chargement de liquide inflammable en conditionnement tel qu'il n'y ait pas épandage (feu de 6 m<sup>2</sup>), terme source standardisé 15 MW*

Potentiel calorifique 63 000 MJ (9 000 MJ pour le véhicule et 54 000 MJ pour le chargement). Vitesse de combustion ~ 60 g/m<sup>2</sup>.s (feu de nappe) (cf. Figure 8).

Ces deux incendies peuvent conduire à un feu de 15 MW, la durée d'incendie varie avec le type de chargement. Le second cas est choisi comme terme source standardisé.

#### **C.2.1.3. Termes sources mettant en jeu un poids lourd (hors TMD)**

Le poids lourd est constitué d'un tracteur et d'une semi-remorque. La nature des chargements (10 tonnes) peut varier. Le potentiel calorifique du tracteur et de la semi-remorque est estimé à 50 000 MJ (7 000 MJ pour le tracteur, 18 000 MJ pour 500 l de gazole et 25 000 MJ pour la remorque (dont 12 pneus).

##### *a. Incendie de «petit PL» ou de PL sans chargement, terme source standardisé 30 MW en pic*

L'incendie dure un peu moins d'une heure avec une pointe très courte à 30 MW. Le potentiel calorifique est de 50 000 MJ (cf. Figure 9).

##### *b. Incendie de PL, terme source standardisé 30 MW*

À titre d'exemple, fruits, légumes (9 tonnes) et emballages (1 tonne). Dès l'incendie du PL, le chargement régularise l'incendie en participant progressivement. Le potentiel calorifique est de 125 000 MJ et l'incendie présente un plateau de 30 MW. Ce cas est choisi comme terme source standardisé (cf. Figure 10).

*c. Incendie de PL avec charge très fortement combustible (matériaux cellulosiques aérés)*  
Cette fois le chargement impose sa vitesse de combustion ( $120 \text{ g/m}^2.\text{s}$ ) et les 100 MW peuvent être atteints. Le potentiel calorifique est de 330 000 MJ (50 000 MJ pour le PL et 280 000 MJ pour le chargement) et le plateau de puissance de l'incendie est de 100 MW (cf. Figure 11).

*d. Incendie de PL avec chargement liquide ou facilement liquéfiable à haut potentiel calorifique, terme source standardisé 100 MW*

Dans ce cas une première estimation, sans épandage, conduit à un incendie de 60 MW pendant une durée de plus de 2 heures (surface  $\sim 30 \text{ m}^2$  – vitesse de combustion  $50 \text{ g/m}^2.\text{s}$ ). Cette hypothèse n'est pas retenue car la remorque perdrait son intégrité, ce qui conduirait à épandage au moins partiel. La puissance de l'incendie dépendra en fait de la taille de la flaque globale créée. Dans le cadre de la détermination des termes sources standardisés, nous retiendrons un palier de puissance de 100 MW (soit une surface totale en feu de  $50 \text{ m}^2$ ) pour un potentiel calorifique total de 450 000 MJ (cf. Figure 12).

#### **C.2.1.4. Citerne de carburant (VTMD), terme source standardisé 200 MW**

Le poids lourd TMD est composé d'un tracteur et d'une citerne de 20 tonnes de carburant.

Le potentiel calorifique est d'environ 960 000 MJ. La puissance d'incendie retenue pour le terme source standardisé est de 200 MW, ce qui correspond à un feu de nappe d'environ  $80 \text{ m}^2$  (cf. Figure 13). Pour peu que l'alimentation en air soit suffisante, des feux de plus grande puissance (flaque plus étendue) doivent être envisagés; *a contrario*, la puissance du feu peut être limitée par le manque d'oxygène pour la combustion.

#### **C.2.2. Gaz toxiques et fumées**

L'incendie en milieu confiné ventilé peut être caractérisé par les effets suivants, dont la dangerosité est appréciée au regard des usagers et des secours.

##### *Manque d'oxygène*

Les termes sources s'appuient sur le principe de Thornton (une combustion dégageant 13,1 MJ correspond à la consommation de 1 kg d'oxygène).

NB: Le débit d'air nécessaire pour générer la puissance maximale repose sur un taux de consommation d'oxygène de 45% de l'oxygène apporté par l'air frais (hypothèse déclinée dans le projet de guide DSC/DR du 13 août 1999 [4]).

##### *Production de $\text{CO}_2$*

L'écriture de quelques réactions de combustion globale d'hydrocarbure ( $\text{C}_7\text{H}_{16}$  par exemple) et de matériaux plastiques oxygénés ( $\text{C H}_{1,4} \text{ O}_{0,22}$  polyester par exemple) conduit à des productions respectives de  $67 \text{ g/s}$  de  $\text{CO}_2$  pour 1 MW et  $85 \text{ g/s}$  de  $\text{CO}_2$  pour 1 MW. La combustion de bois ( $\text{CH}_{1,7} \text{ O}_{0,72}$ ) conduit à une production théorique

de 102 g/s de CO<sub>2</sub> pour 1 MW. Il a été choisi l'hypothèse de 100 g/s de CO<sub>2</sub> pour un feu de 1 MW proposé par le projet de guide DSC/DR [4], valeur légèrement majorante pour bon nombre de matériaux ou matières.

#### *Production de CO*

À partir des valeurs tabulées par Tewarson [1] correspondant à différents essais (bien ventilés):

$$\text{Huile minérale: } R = \left( \frac{[CO_2]}{[CO]} \right)_{vol} \approx 38$$

Matériau plastique oxygéné: R ~ 13

Matériau polyuréthane rigide: R ~ 24

Il est proposé de retenir pour les **incendies bien ventilés R = 25**. Par contre dans le cas des **feux sous-ventilés** ce rapport sera pris, à partir de l'expérience de l'Ineris [2], égal à 5.

#### *Toxicité spécifique*

Pour les ESD, il est réalisé une étude du trafic et de l'environnement. Chaque fois que nécessaire, et en particulier dans le cas du trafic des poids lourds, il y aurait lieu d'examiner les spécificités de certains chargements pas forcément répertoriés en marchandises dangereuses tels que les matériaux synthétiques (polychlorure de vinyle et production d'acide chlorhydrique, polyuréthane et production d'acide cyanhydrique et oxydes d'azote, ...). Le passage fréquent de tels produits devrait faire l'objet d'un terme source particulier dans une ESD. Plus particulièrement, la production de produits nocifs tels que HCl, HCN, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> serait alors à caractériser.

### **C.2.3. Opacité**

L'évaluation de l'opacité des fumées dans le tunnel pourra être déterminée à partir de la relation<sup>1</sup>:

$$K = 83\,000 C_{CO_2} / Tg$$

*K* Coefficient d'extinction [m<sup>-1</sup>]

*Tg* Température du mélange gazeux en un point du tunnel [K]

*C<sub>CO<sub>2</sub></sub>* Fraction volumique du CO<sub>2</sub> au même point (m<sup>3</sup> de CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de mélange) [-]

La distance de visibilité *d* est alors donnée par:

$$d = C / K$$

où *C* est un coefficient qui dépend des conditions d'éclairément et du contraste de l'objet à voir. *C* est en général pris entre 2 et 6.

<sup>1</sup> Ou toute relation équivalente.

### C.3. Bibliographie

- [1] A. TEWARSON «Generation of heat and fire products» Technical report. Factory Mutual Research, may 1995.
- [2] G. MARLAIR, J.P. BERTRAND et S. BROHEZ, Use of the ASTM E 2058 fire propagation apparatus for the evaluation of the under-ventilated fires. Fire and Materials 2001. San Francisco (USA), janv. 2001.
- [3] CEC Agreement 7210 – SA/211/318/518/620/933, Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in closed car parks, Draft final report, Profil Arbed (L), Univerté de Liège (B), CTICM (F), TNO (NL), Labein (E). March 1997.
- [4] Projet de Guide DSC/DR Incendies dans les tunnels routiers: objectifs et hypothèses en matière de désenfumage et de comportement au feu, CETU, octobre 1999.

### C.4. Figures

On donne ici les courbes d'évolution de la puissance dégagée en fonction du temps pour différents types d'incendies. Les courbes de consommation de  $O_2$ , de production de  $CO_2$ , de production de  $CO$  et d'émission d'opacité se déduisent directement des courbes de puissance en utilisant les facteurs de proportionnalité indiqués aux paragraphes C.2.2. et C.2.3.

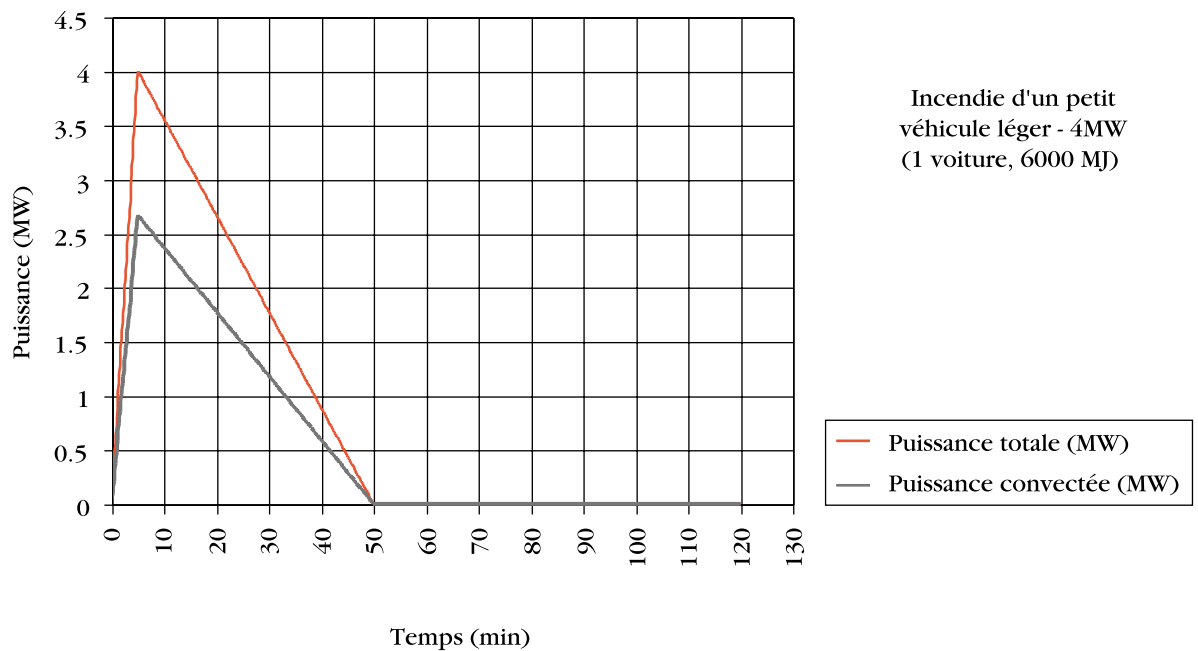


Figure 1

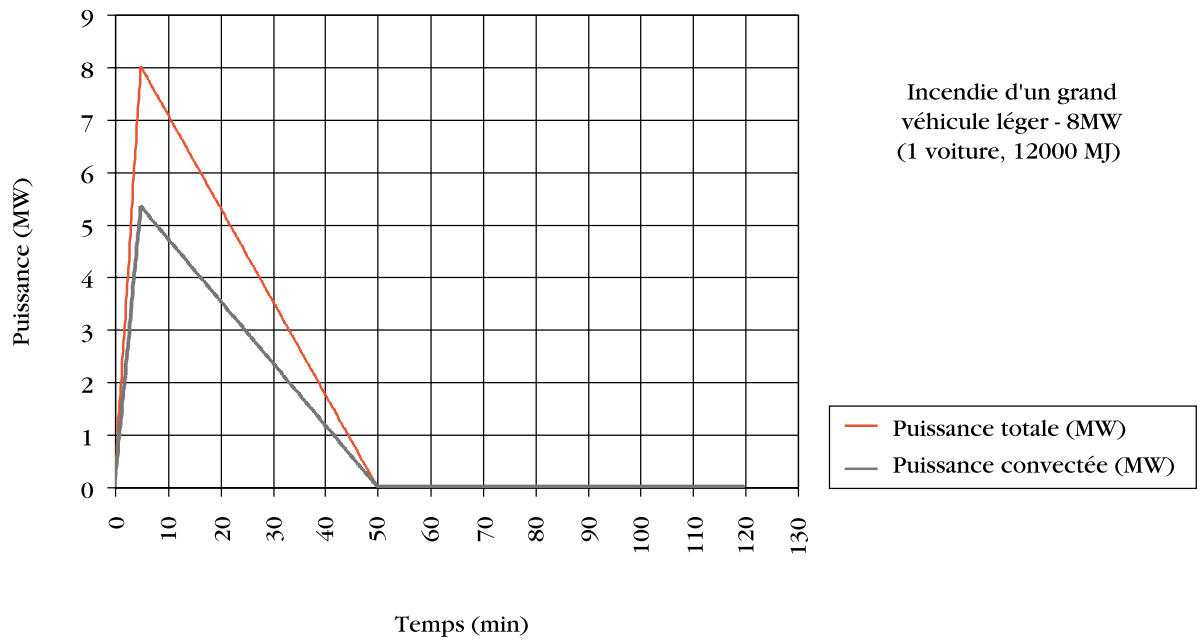


Figure 2

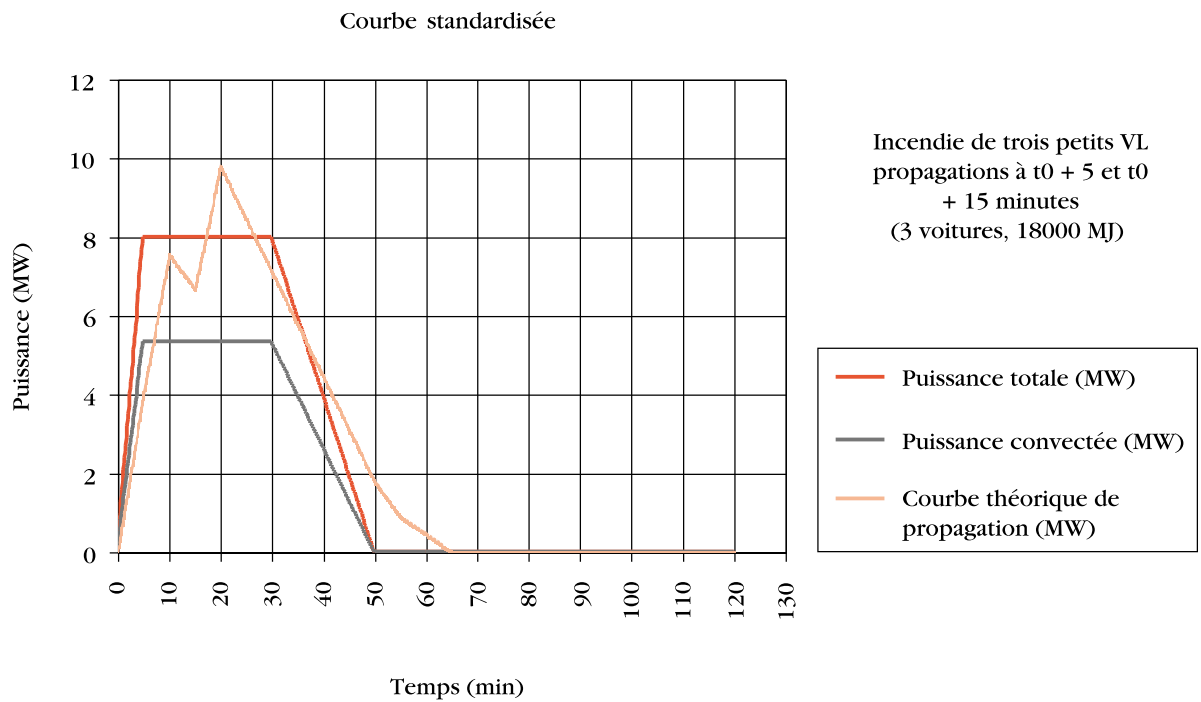


Figure 3

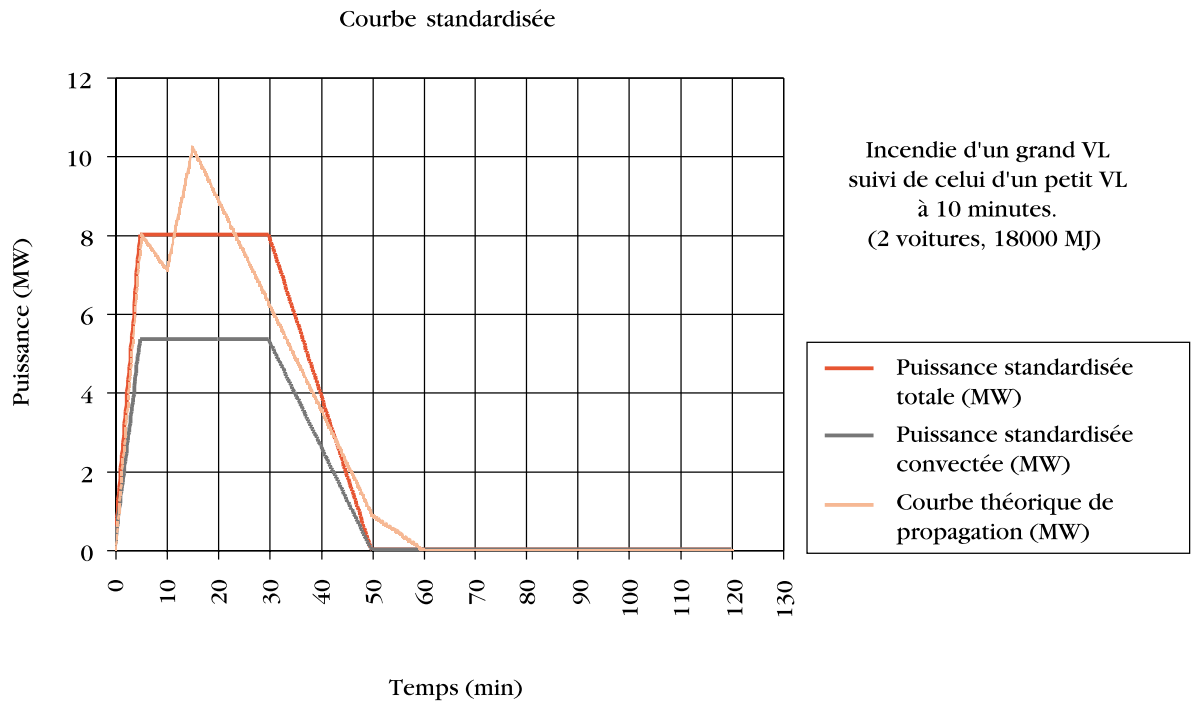


Figure 4

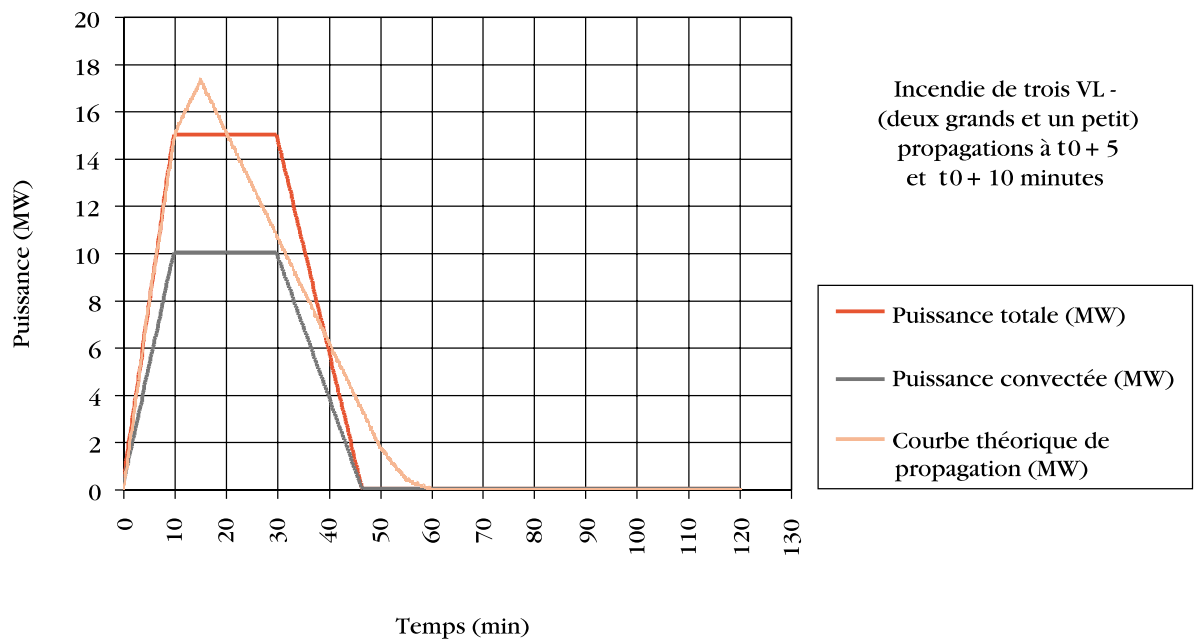


Figure 5

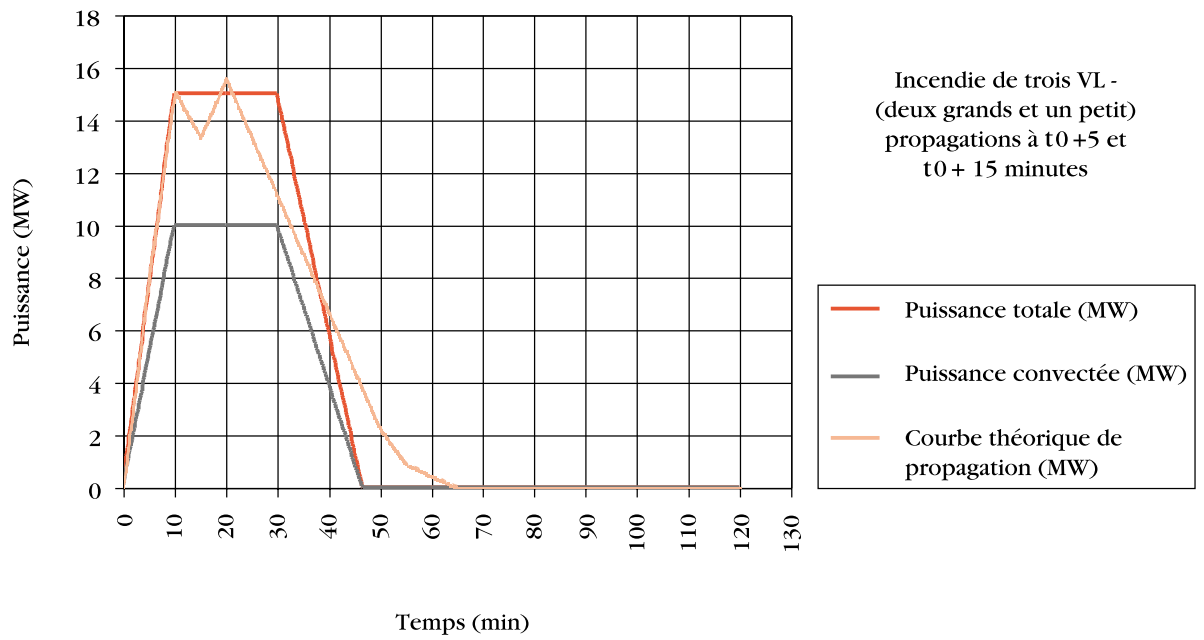


Figure 6

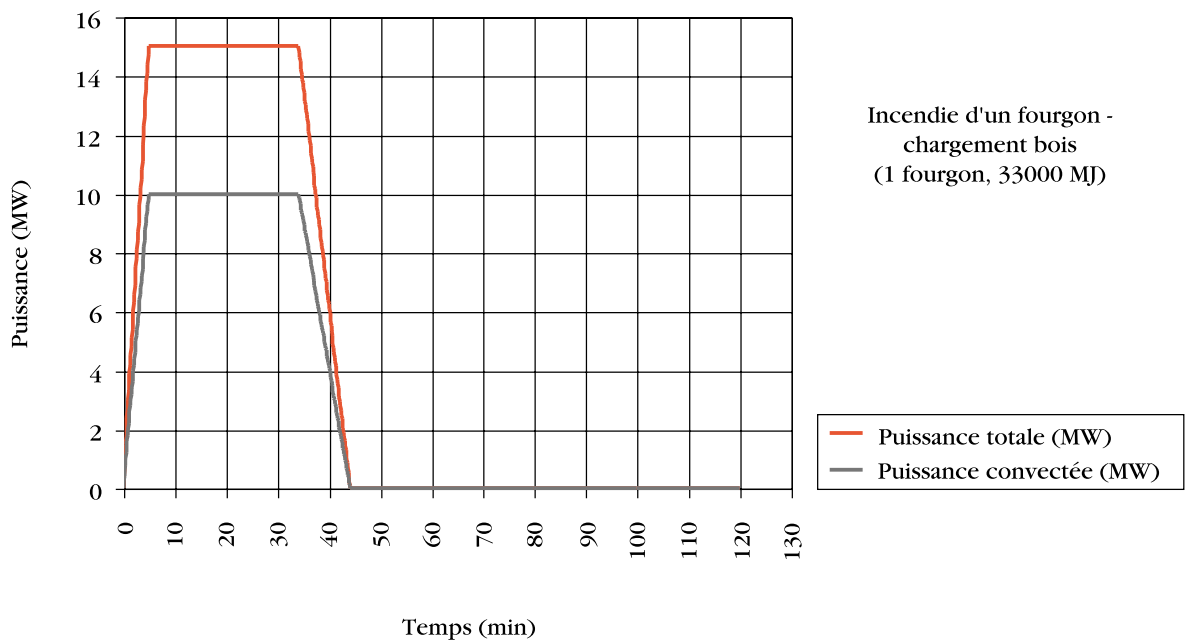


Figure 7

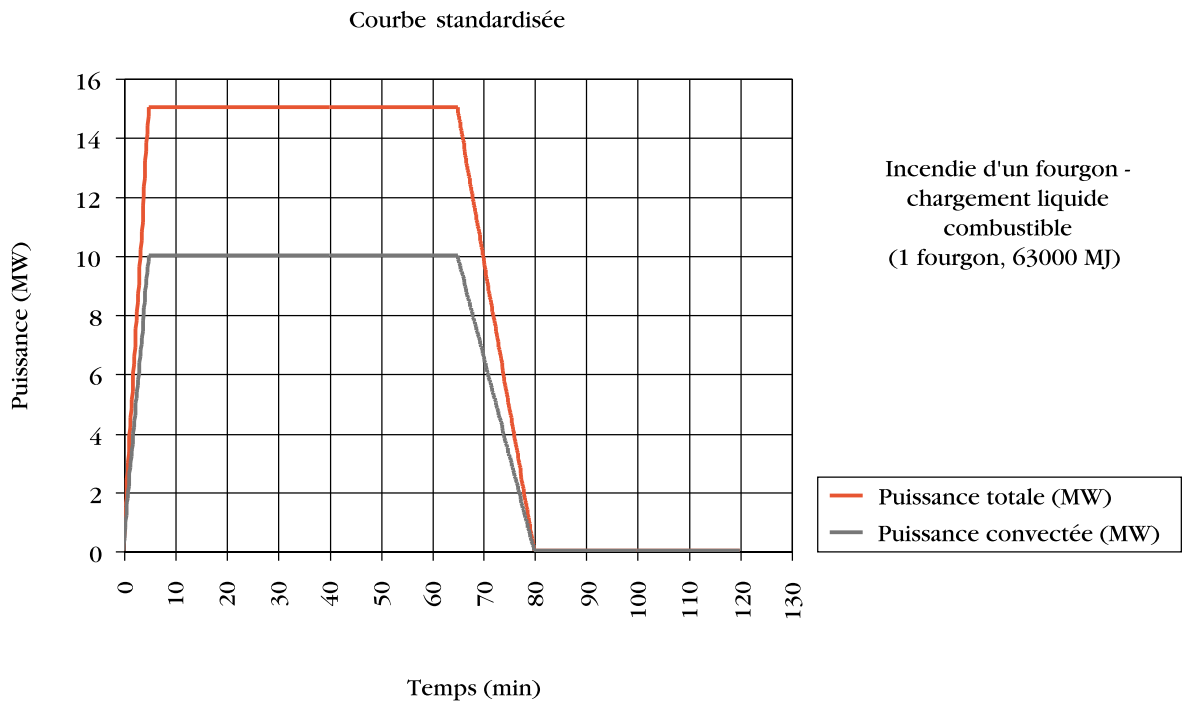


Figure 8

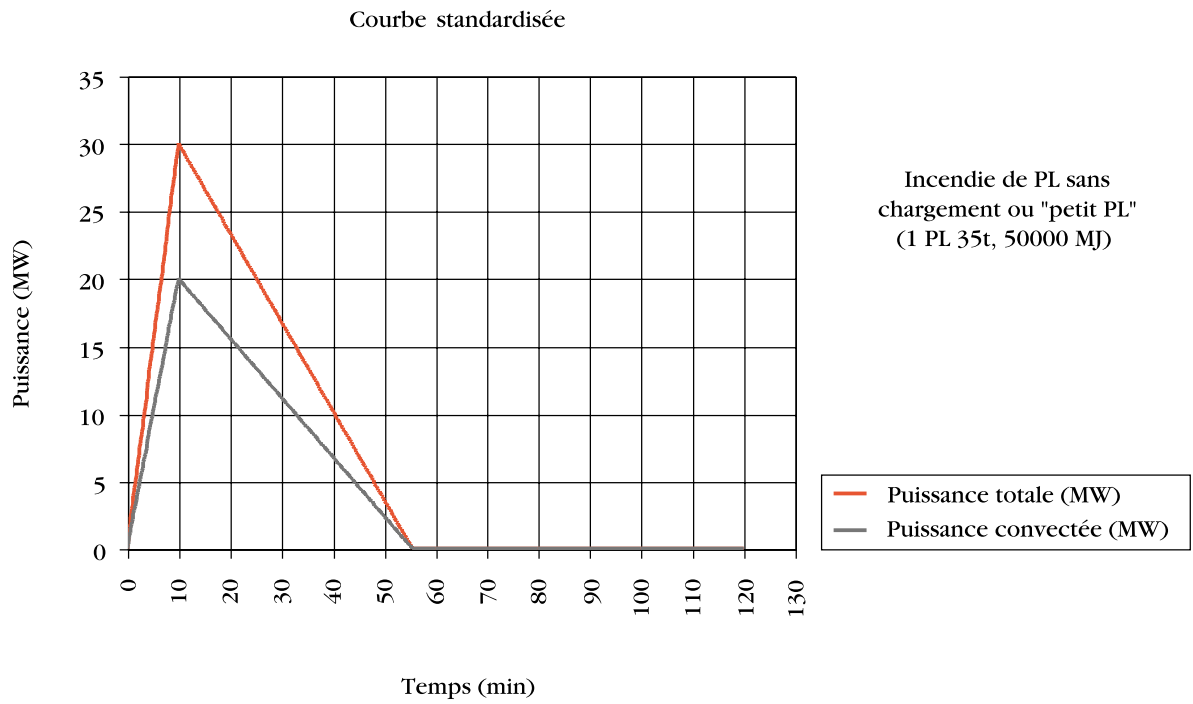


Figure 9



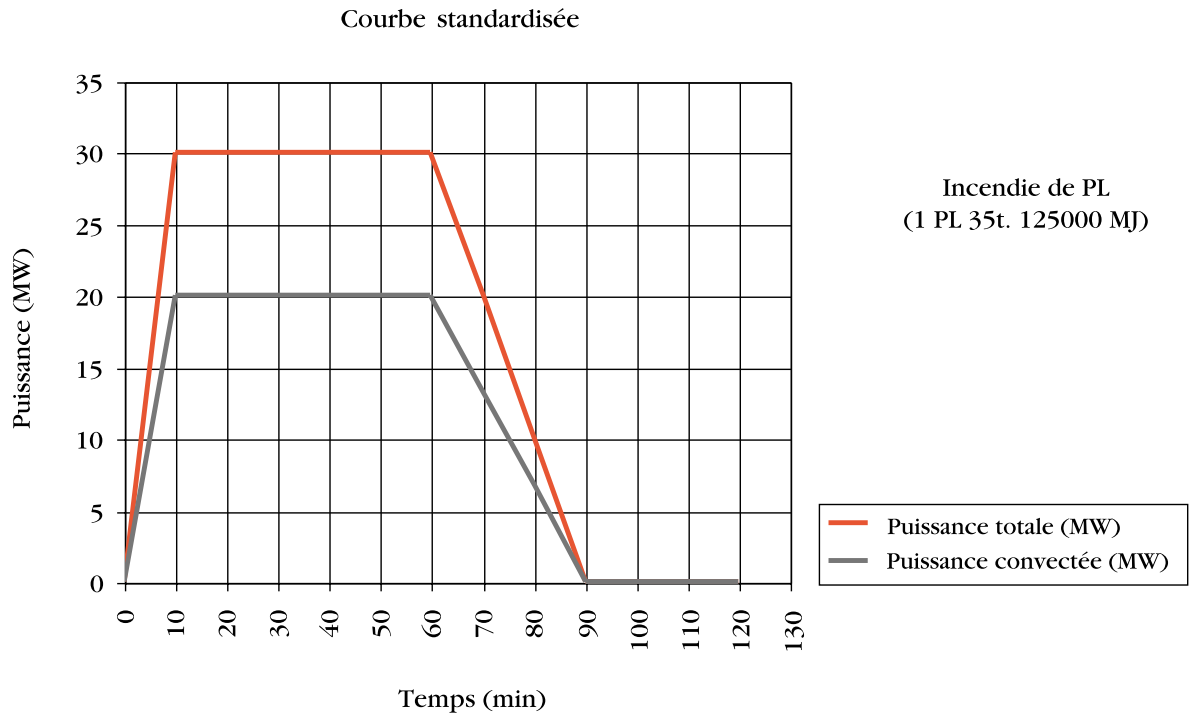


Figure 10

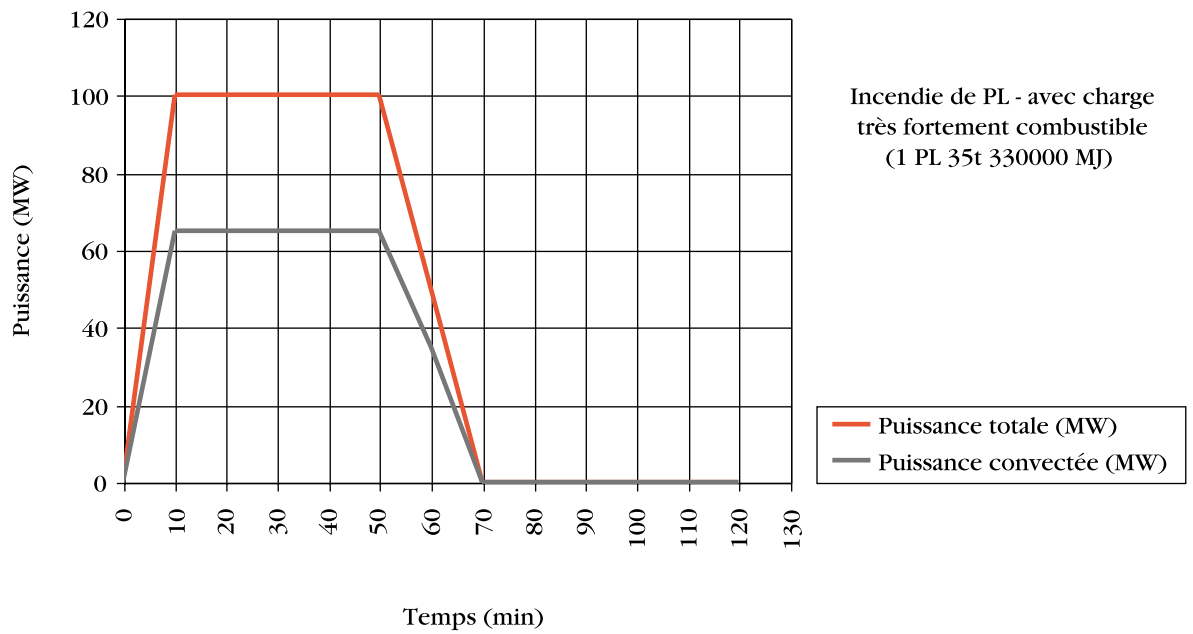


Figure 11

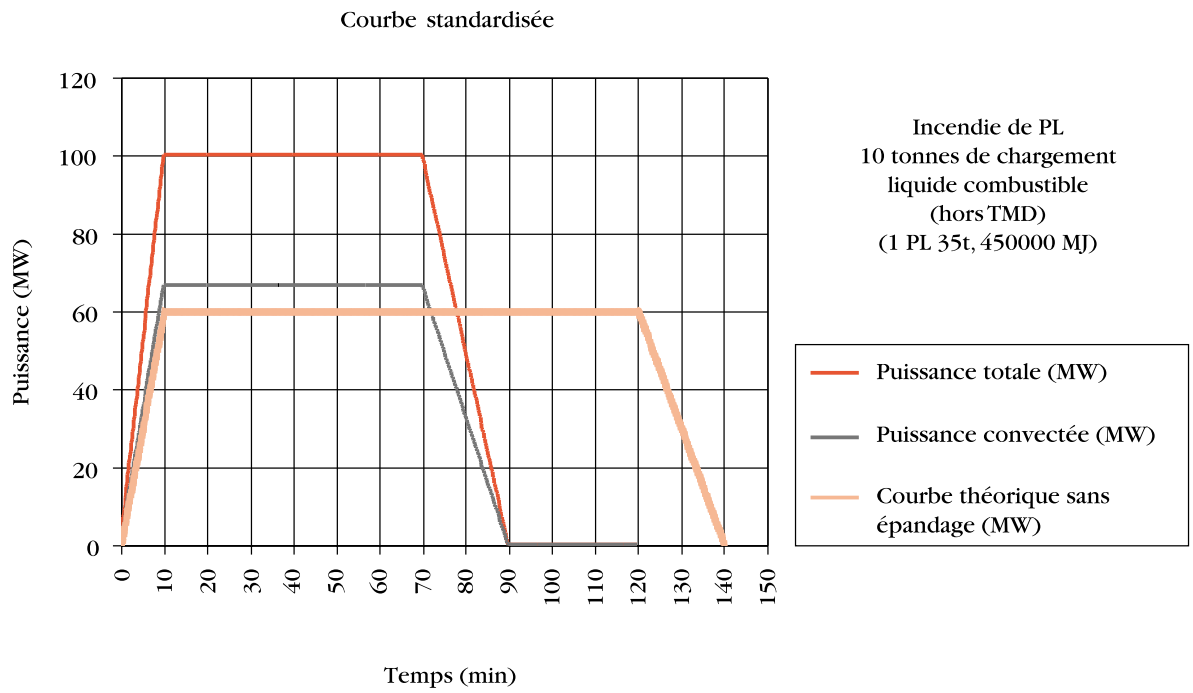


Figure 12

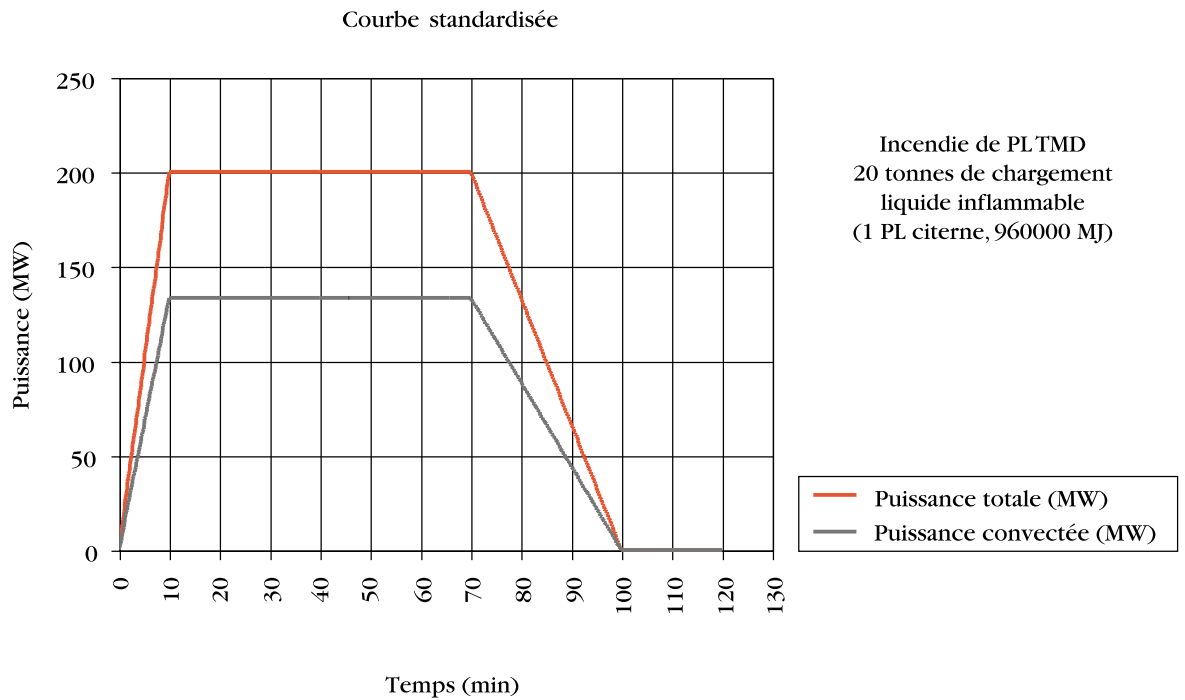


Figure 13

# Spécifications pour la modélisation du mouvement des fumées

## D.1. Description du mouvement des fumées

Le mouvement des fumées lors d'un incendie en tunnel est influencé par de nombreux facteurs, en particulier la géométrie du tunnel, la différence de pression atmosphérique entre les deux têtes du tunnel (dite «contre-pression»), la commande de la ventilation, les caractéristiques et la localisation de l'incendie dans le tunnel, le pistonnement de l'air par les véhicules, l'effet cheminée, les pertes thermiques aux parois, etc.<sup>1</sup>

Les équations physiques qui régissent ces phénomènes sont :

- l'équation-bilan de masse;
- l'équation-bilan de chaleur;
- l'équation-bilan de quantité de mouvement (scalaire ou vectorielle selon la dimension du problème);
- l'équation de transport de polluant.

Du fait des nombreux phénomènes qui entrent en jeu et de la complexité des équations, on utilise en général des modèles numériques. Dans de nombreux cas cependant, les éléments les plus fondamentaux peuvent être déterminés sans modèle compliqué, à l'aide de quelques équations simples. Ces équations permettent d'obtenir des ordres de grandeur avant de faire tourner des modèles, mais aussi d'interpréter de façon critique les résultats des modèles. La présente annexe commence par présenter ces méthodes simplifiées, avant de discuter des modèles numériques employés pour décrire le mouvement des fumées.

### D.1.1. Calcul de la température

Quand le courant d'air est fort, la fumée est repoussée d'un seul côté du foyer, et des méthodes de bilan simples permettent de calculer la température moyenne sur une section juste sous le vent du foyer. Quand l'écoulement est complètement déstratifié, cette température est en fait la température maximale que peut atteindre l'air en dehors des flammes.

La puissance thermique du foyer  $\dot{Q}_{tot}$  est dissipée par rayonnement direct sur les parois du tunnel et par transfert convectif dans l'air du tunnel. On peut considérer que la puissance transférée par convection à l'air  $\dot{Q}_c$  vaut environ les deux tiers de la puissance totale dégagée  $\dot{Q}_{tot}$ .

<sup>1</sup> Pour plus de détails sur la physique des incendies en tunnel et les équations décrivant ce type de problème, le lecteur pourra se référer au fascicule ventilation du dossier pilote des tunnels ainsi qu'au mode d'emploi du logiciel CAMATT, disponibles au Cetu.

La température moyenne de l'air immédiatement sous le vent du foyer vaut donc :

$$T_{max} = \frac{\dot{Q}_c}{\rho_0 C_P A V_0} + T_0$$

$\dot{Q}_c$	Puissance convective de l'incendie	[W]
$\rho_0$	Masse volumique de l'air frais	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$C_P$	Chaleur massique à pression constante de l'air	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$A$	Section du tunnel	[m <sup>2</sup> ]
$T_0$	Température de l'air frais	[°C]
$V_0$	Vitesse de l'air frais	[m.s <sup>-1</sup> ]

La loi d'évolution longitudinale de la température sous le vent du foyer s'écrit alors :

$$T(x) = T_\infty + (T_{max} - T_\infty) e^{-x/x_e} \quad \text{où} \quad x_e = \frac{C_P \rho_0 V_0}{4h_{app}} \cdot D_H$$

$x$	Abscisse curviligne comptée à partir de l'incendie	[m]
$D_H$	Diamètre hydraulique du tunnel	[m]
$T_\infty$	Température dans le massif loin du tunnel	[°C]
$h_{app}$	Coefficient d'échange thermique apparent	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]

Le coefficient d'échange thermique apparent  $h_{app}$  prend en compte les transferts convectifs et radiatifs aux parois et l'échauffement des parois en fonction du temps écoulé après le début de l'incendie. En général, on retient pour ce coefficient d'échange thermique apparent des valeurs entre 10 et 50 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>. Le tableau ci-dessous indique les valeurs très prudentes retenues dans le fascicule *Ventilation* du dossier pilote des tunnels.

Vitesse du courant d'air	15 min	60 min	120 min
3 m/s	10 W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>	7 W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>	6 W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>
4 m/s	14 W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>	10 W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>	7 W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>

## D.1.2. Calcul de la vitesse critique

La vitesse critique est définie comme la vitesse de l'air en amont du foyer qui permet de ne pas avoir de remontée de fumées (nappe de retour ou backlayering) à l'encontre de la direction principale du flux d'air dans le tunnel. La vitesse critique dépend principalement de la puissance thermique de l'incendie, de la pente et de la section du tunnel. La formule de Danziger et Kennedy<sup>2</sup> est la plus couramment utilisée.

<sup>2</sup> Danziger N.H., Kennedy W.D., 1982. Longitudinal ventilation analysis for the Glenwood Canyon tunnels. In *4<sup>th</sup> Int. Symp. on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, pp. 169-186. BHRA Fluid Engineering.

Elle utilise les deux relations suivantes couplées, que l'on résout en quelques itérations :

$$\begin{cases} V_c = 0.61K_p \left( \frac{g\dot{Q}_c H}{\rho_0 C_p A T_f} \right)^{1/3} \\ T_f = \frac{\dot{Q}_c}{\rho_0 C_p A V_c} + T_0 \end{cases}$$

$A$	Section du tunnel	[m <sup>2</sup> ]
$C_p$	Chaleur massique de l'air	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$g$	Accélération gravitationnelle	[m.s <sup>-2</sup> ]
$H$	Hauteur du tunnel	[m]
$K_p$	Coefficient de pente. Varie entre 1,0 ( pente nulle) et 1,23 (pente de 10%)	[-]
$\dot{Q}_c$	Puissance convective de l'incendie	[W]
$T_0$	Température de l'air en amont du foyer	[K]
$T_f$	Température de mélange des fumées au foyer	[K]
$V_c$	Vitesse critique	[m.s <sup>-1</sup> ]
$\rho_0$	Masse volumique de l'air en amont du foyer	[kg.m <sup>-3</sup> ]

## D.2. Les différents modèles

### D.2.1. Modèles 1D

Les modèles 1D résolvent les équations de la mécanique des fluides en supposant que les paramètres physiques (vitesse, température, pression, concentration) sont uniformes dans la section (cf. le mode d'emploi du logiciel CAMATT, disponible au Cetu). En particulier, un modèle 1D ne renseigne pas directement sur l'état de stratification des fumées.

Les modèles 1D existants présentent différents niveaux de modélisation. En effet, ils ne prennent pas tous en compte les effets transitoires et les effets thermiques. Certains sont isothermes en régime permanent, d'autres isothermes transitoires, d'autres encore anisothermes transitoires. On retiendra uniquement des modèles anisothermes transitoires, du type CAMATT ou équivalent, sauf si l'on peut justifier de retenir des modèles plus simples. Quel que soit le modèle utilisé, il faut lors de la présentation des calculs préciser les différents paramètres qui ont été utilisés pour la simulation; par exemple, on indiquera les coefficients de pertes de charge utilisés en entrée/sortie, la rugosité des parois, les caractéristiques aérodynamiques des véhicules utilisées pour le calcul du pistonnement, le coefficient d'efficacité des accélérateurs, la façon dont sont pris en compte les changements de sections, la façon dont sont pris en compte les échanges de chaleur aux parois, etc.

L'avantage des modèles 1D provient de leur souplesse d'emploi, qui permet d'étudier un grand nombre de scénarios et de multiplier les variantes à étudier pour un coût réduit.

De plus, ils fournissent toujours des renseignements précieux pour la compréhension de l'aérodynamique de l'ouvrage, même pour les tunnels ventilés transversalement (en particulier ceux comportant plusieurs cantons). Ils permettent également une bonne évaluation des temps de réponse de la ventilation. Pour ces deux derniers points, la modélisation 1D est en générale plus efficace que la modélisation 3D.

Ces modèles sont particulièrement bien adaptés à l'étude de la ventilation longitudinale. Pour les autres systèmes de ventilation, leur utilisation nécessite plus d'expertise. Par exemple, un modèle 1D ne peut pas reproduire le phénomène de nappe de retour qui apparaît lorsque la vitesse du courant d'air est inférieure à la vitesse critique. La température fournie par un modèle 1D, qui correspond à une température supposée uniforme sur la section, ne renseigne pas sur les conditions de survie à hauteur d'homme ni sur les températures maximales atteintes en haut de section, ni même sur la température moyenne quand la vitesse d'air est quasiment nulle au droit du foyer<sup>3</sup>.

L'interprétation des résultats fournis par un modèle 1D repose donc principalement sur l'analyse raisonnée des vitesses d'air calculées<sup>4</sup>, qui est indispensable dans une ESD.

## D.2.2. Modèles tridimensionnels

Par abus de langage, on appelle ici modèles CFD («Computational Fluid Dynamics») les modèles qui résolvent les équations de la mécanique des fluides sur une grille de calcul 3D<sup>5</sup>.

La mise en œuvre de ces modèles nécessite des connaissances assez pointues dans de nombreux domaines de la physique (mécanique des fluides, thermodynamique, transfert de chaleur, rayonnement, combustion). La modélisation de certains phénomènes physiques continue d'évoluer à des niveaux de recherche fondamentale, ce qui nécessite un certain suivi de cette actualité scientifique: c'est le cas des modèles de turbulence, des modèles de combustion et des modèles de rayonnement. L'utilisation de ces modèles pour les incendies de forte puissance, pour lesquels on dispose de peu de données expérimentales de validation est donc périlleuse. Le réalisme des résultats en termes de nappe de retour ou de stratification est loin d'être assuré. Cet aspect doit toujours être clairement argumenté lors de l'analyse des résultats fournis par le code de calcul.

<sup>3</sup> Toute température supérieure à 1000°C est à interpréter avec précaution, aussi bien dans les sections très chaudes que dans les sections avoisinantes.

<sup>4</sup> On sait par exemple que pour des vitesses d'air supérieures à la vitesse critique, le modèle fournit des résultats fiables et réalistes. Lorsque la vitesse d'air est inférieure à la vitesse critique, une nappe de fumées stratifiées se développe au vent du foyer. On sait également que lorsque la vitesse du courant d'air est faible (inférieure à 1,5 m/s), l'écoulement sous le vent du foyer a de fortes chances d'être stratifié.

<sup>5</sup> On notera que ces modèles ne sont pas utilisables en 2D dès qu'il y a un courant d'air longitudinal car la structure de l'écoulement est fortement tridimensionnelle dans la zone du foyer.

La formation de l'utilisateur joue un rôle important sur la qualité des résultats obtenus. On considère en général qu'un diplôme de modélisation numérique pour la mécanique des fluides de niveau bac + 5 ou équivalent est nécessaire. Il est également nécessaire que l'utilisateur soit rompu à l'emploi du code de calcul particulier dont il dispose et souhaitable qu'il possède une expérience importante en matière de modélisation des problèmes de désenfumage des tunnels routiers. En effet, d'un utilisateur à l'autre, d'un code de calcul à l'autre, les résultats obtenus peuvent être très variables, même avec des codes de qualité industrielle. La raison en est que les modèles CFD ont besoin de données d'entrées détaillées (conditions initiales du calcul, conditions aux limites –tout spécialement les niveaux d'énergie turbulente et de dissipation–, représentation du foyer, représentation des véhicules bloqués, échanges de chaleur aux parois, etc.). Les différentes hypothèses et approximations effectuées au moment de la définition du calcul ont une influence importante sur les résultats. Un autre point qui nécessite une bonne expertise est le jugement de la convergence des calculs. En effet, le respect du critère de convergence ne garantit pas que le modèle informatique a convergé vers une solution physiquement plausible: en général, cela est dû à une viscosité numérique excessive, elle-même liée aux choix faits explicitement ou non par l'utilisateur du logiciel.

Par ailleurs, les ressources informatiques nécessaires sont importantes et certaines simulations peuvent atteindre des temps de calcul très longs sur stations de travail. Le domaine de calcul est forcément limité et l'on considère que la modélisation en 3D d'un tronçon de tunnel d'une longueur de 1 km constitue à l'heure actuelle la limite raisonnable. Pour les tunnels d'une longueur supérieure, on doit coupler le calcul 3D avec un calcul 1D (ou à défaut fixer les conditions limites d'entrée/sortie du tronçon à l'aide des résultats fournis par un code 1D).

Il convient d'utiliser à chaque étape de la simulation une démarche qualité adaptée. On pourra par exemple s'inspirer du guide publié par l'ERCOFTAC<sup>6</sup>.

### D.2.3. Choix du niveau de modélisation pertinent

Les éléments à considérer lors du choix du niveau de complexité de la représentation des fumées sont la stratégie de désenfumage mise en place, la stratégie d'évacuation des usagers, le fait que le scénario considéré soit couvert ou non par le dimensionnement de l'ouvrage. Les enseignements que l'on souhaite tirer de la simulation ont également une influence importante sur le choix.

Pour choisir le niveau, on peut dans un premier temps, sauf cas particulier, se baser sur le profil en travers du tunnel considéré:

- pour des tunnels de hauteur sous voûte courante et possédant au plus 3 voies de circulation, une modélisation 1D suffit. En effet, lorsque le tunnel est équipé

<sup>6</sup> Special Interest Group on "Quality and Trust in Industrial CFD"- Best Practice Guidelines, ERCOFTAC, janvier 2000; voir les sites <http://imhefwww.epfl.ch/ERCOFTAC/>, et <http://www.qnet-cfd.net/>

d'un système de ventilation en longitudinal, le 1D est clairement le plus adapté. Dans le cas des tunnels longs équipés d'une ventilation transversale, seul le 1D permet de modéliser l'ensemble du système et de vérifier ainsi la limitation du courant d'air dans la zone du foyer;

- pour des tunnels de hauteur sous voûte supérieure à 7 à 10 mètres, avec 4 voies de circulation ou plus, ou possédant des échangeurs souterrains complexes, une simulation CFD tridimensionnelle est sans doute plus appropriée. En effet, elle permettra de se rendre compte que le tunnel est moins dangereux que ne le montrerait une simulation 1D où les fumées occupent par définition la totalité de la section.

Rien n'interdit *a priori* d'utiliser un outil CFD même dans des cas relativement simples. En revanche, **lorsqu'un modèle CFD sera utilisé pour l'ESD, il faut toujours réaliser et interpréter un calcul 1D préalable**. Cela permet de déterminer les bonnes conditions initiales et aux limites à utiliser pour le calcul CFD. Les résultats du modèle 1D permettront également d'alimenter la réflexion et d'aider à l'interprétation des résultats CFD. **Il faut également toujours donner en annexe de l'ESD les éléments permettant de juger de son réalisme**. L'objet du paragraphe suivant est de proposer un plan type pour cette annexe de l'ESD.

## Notes

---

---

---

---

---

---

---



### D.3. Plan type de l'annexe «Présentation des calculs tridimensionnels»

Une annexe de présentation des calculs tridimensionnels et des hypothèses faites doit être incluse dans toute ESD ayant utilisé des modèles de ce type. On s'attachera à y présenter des informations suffisamment détaillées pour au moins un des scénarios étudiés, de préférence un scénario faisant intervenir une puissance d'incendie pour laquelle il existe dans la littérature un retour d'expérience suffisant permettant de juger du réalisme de la simulation.

Cette annexe devra contenir les éléments listés dans le plan type ci-après. Bien que cette liste soit longue, les vérifications qu'elle requiert font partie de la bonne pratique de l'utilisation de la CFD et les bureaux d'études font en général ces vérifications en interne. Cette annexe n'est donc que l'intégration dans l'ESD d'éléments nécessaires à la réalisation de l'étude, afin de permettre au lecteur de comprendre les hypothèses de la simulation.

#### 1. Principes de la modélisation physique

Hypothèses sur la nature des écoulements simulés.

Variables prises en compte.

Équations résolues, modèle de turbulence, lois de parois utilisées, prise en compte des termes de flottabilité.

Détails sur les modèles de rayonnement et de combustion éventuellement utilisés.

#### 2. Principes de résolution

Schémas de discrétisation en temps et en espace, algorithmes de résolution, pas de temps utilisés, critère de convergence retenu.

#### 3. Domaine de calcul

Dimensions du tronçon de tunnel représenté, dimensions du profil en travers, exposé des éventuelles simplifications géométriques effectuées pour la modélisation.

Présentation du maillage<sup>7</sup>: vue longitudinale, vues transversales en différentes sections (au voisinage du foyer, d'un accélérateur, d'une trappe, etc.), nombre total de mailles, nombre de mailles dans une section, taille des mailles aux parois.

<sup>7</sup> Le maillage est l'une des premières sources de variabilité des résultats d'un code CFD. Il est nécessaire que le maillage soit raffiné dans la zone du foyer, près de l'entrée et de la sortie du domaine de calcul, au voisinage des équipements de ventilation (accélérateurs, trappes de désenfumage, bouches de soufflage), au voisinage des parois (afin de respecter les critères d'emploi des lois de paroi). Une vingtaine de mailles dans la hauteur du tunnel est au minimum nécessaire pour espérer reproduire correctement la stratification des fumées. Dans l'idéal, un test de sensibilité devrait être présenté sur un scénario en utilisant 2 maillages présentant un niveau de raffinement différent. Ce dernier point n'est pas exigé mais seulement conseillé.

## 4. Choix, présentation et justification des hypothèses

Conditions d'entrée/sortie aux têtes.

Nature des conditions aux limites utilisées: pression, débit de masse, vitesse, profils établis ou non, etc.

Évolution au cours du temps des valeurs imposées aux différentes variables.

Indication des niveaux de turbulence lorsqu'ils sont imposés.

Justification des valeurs choisies (à partir des résultats d'un modèle 1D, etc.).

Représentation des véhicules (préciser si le pistonnement et le blocage par les véhicules arrêtés est pris en compte, et si oui, comment).

Représentation du foyer<sup>8</sup>.

Représentation des éventuels accélérateurs (modélisation par un maillage de l'accélérateur ou comme source de quantité de mouvement et de turbulence, par exemple).

Représentation des trappes de désenfumage et des bouches de soufflage (préciser si le soufflage est reproduit en modélisant chacune des bouches ou si une répartition linéique est utilisée).

Rugosité des parois.

Prise en compte de l'échauffement des parois ou justification de sa non prise en compte.

## 5. Analyse et présentation des résultats

Résultats de calculs utilisés pour étudier les dangers:

- critère utilisé pour déterminer l'état de stratification des fumées;
- façon dont est calculée la visibilité;
- modèle utilisé pour calculer la puissance rayonnée reçue par les usagers.

Sorties supplémentaires pour montrer le réalisme de la simulation:

- détails sur les écoulements (direction, vitesse, grandeurs turbulentes) en plus des contours de température/concentration aux instants clefs;
- profils verticaux de concentration aux endroits significatifs (issues de secours par exemple);
- température moyenne de la source de chaleur;
- étendue de la zone de combustion lorsqu'un modèle de combustion est utilisé;
- tout autre élément jugé nécessaire par le bureau d'études.

<sup>8</sup> Dans la réalité, l'influence du foyer sur la stratification des fumées est mal connue. Tous les foyers ne conduisent pas en effet à des fumées stratifiées. Des feux de très faible puissance peuvent produire des fumées très peu chaudes, et donc de faibles forces de flottabilité. D'autre part, les turbulences induites par la combustion au niveau du foyer peuvent conduire à une déstratification des fumées, même en présence de conditions aérauliques favorables (faible courant d'air longitudinal). La façon dont on représente le foyer dans le modèle numérique a donc une influence importante sur les résultats. Dans l'idéal, un test de sensibilité devrait être présenté sur un scénario donné en réalisant deux calculs utilisant des représentations différentes de l'incendie mais plausibles physiquement. Ce dernier point n'est pas exigé mais seulement conseillé.

# Modélisation du comportement des usagers

Dans cette annexe sont donnés des éléments pour modéliser le comportement des usagers dans leurs véhicules et à pied.

## E.1. Formation de files de véhicules

Il est essentiel de disposer d'un modèle de formation de files permettant d'évaluer le nombre de véhicules dans le tunnel, afin de connaître le nombre d'usagers présents et l'influence du trafic sur le mouvement des fumées (pistonnement). Le modèle proposé ici est volontairement très simplifié afin de ne pas masquer les nombreuses inconnues d'un tel problème.

### E.1.1. Circulation en régime fluide

Quand la circulation se fait en trafic fluide, permanent et homogène, on a  $I = V/D$  et  $N = L/I$ , et donc  $N = (L \cdot D)/V$ , où :

$I$  est l'interdistance en mètres entre véhicules en mouvement (pare-choc avant à pare-choc avant)

$V$  est la vitesse en mètres par seconde

$D$  est le débit sur une voie en véhicules par seconde

$N$  est le nombre de véhicules présents dans le tunnel sur une voie

$L$  est la longueur du tunnel en mètres.

On doit par ailleurs avoir pour une circulation sûre :  $I > I^*$  (interdistance de sécurité). Cette interdistance de sécurité dépend de la longueur moyenne des véhicules et de leur vitesse  $V$ . En France, on peut retenir<sup>1</sup>  $I^* = 8 + 0,2 V + 0,003 V^2$ , avec  $V$  en km/h. Quand  $I < I^*$ , on peut considérer qu'il y a risque de congestion.

Il est important de noter que ce n'est pas avec le débit le plus élevé que le nombre de véhicules présents dans le tunnel est le plus grand. Par exemple, pour un tunnel à 1 tube unidirectionnel (deux voies de circulation) de 1 200 m de long, on trouve, par voie, les données du tableau ci-dessous.

	V (km/h)	I* (m)	I (m)	D (véh/h)	N (véh)
Trafic fluide	70	40	47	1 500	30
Trafic saturé	50	26	26	2 000	46
Trafic saturé	20	13	13	1 500	92

<sup>1</sup> M. Cohen, INRETS; cette formule utilise une longueur moyenne des véhicules de 8 m. En toute rigueur on pourrait adapter la longueur moyenne à la composition spécifique du trafic du tunnel, mais sauf cas très particuliers en taux et longueurs des PL, ce n'est pas utile pour un calcul qui reste de toute façon approché (non prise en compte de l'influence sur le débit de la gêne apportée par les PL etc.).

## E.1.2. Formation d'un bouchon

Quand un incendie se produit, on supposera que le trafic est entièrement bloqué au droit du foyer à l'instant  $t = 0$ , à une distance  $d$  de l'entrée (exprimée en mètres), et que la vitesse de remontée de bouchon est de  $v$  mètres par seconde. Cette vitesse sera calculée par la formule approchée  $v = D / (1/I(0) - D/V)$ , où  $I(0)$  est l'interdistance standardisée à l'arrêt, qui sera prise égale à 10 m (longueur moyenne de 8 m plus 2 m d'intervalle entre les véhicules). La congestion remonte jusqu'à l'entrée du tunnel en un temps  $T = d/v$ .  $T$  est alors à comparer au délai nécessaire pour fermer le tunnel.

La vitesse de remontée de bouchon conditionne également la probabilité d'un carambolage en fin de file. Ainsi, pour une vitesse de remontée de bouchon supérieure à 15 km/h on considère en général qu'une gestion par les patrouilleurs devient impraticable, et les risques élevés.

Dans l'exemple de tunnel précédent, au débit théorique de saturation sur deux voies de 3000 véh/h à 70 km/h, on trouve une vitesse de remontée de bouchon de 5,3 m/s, soit 20 km/h. Si l'incendie a lieu au milieu du tunnel, le bouchon remonte jusqu'à l'entrée en moins de 120 s, c'est-à-dire moins de 2 minutes.

## E.2. Évacuation des usagers

Pour modéliser le déplacement des usagers qui quittent leurs véhicules et rejoignent à pied les issues de secours, on utilisera le modèle très simplifié suivant:

- délai moyen d'évacuation complète d'un véhicule: 1,5 min pour un VL et un PL, 5 min pour un car;
- vitesse de marche:
  - 1 m/s pour des conditions de visibilité claire,
  - 0,5 m/s si la visibilité est fortement gênée,
  - en l'absence de visibilité, 0,3 m/s (à ne considérer que pour les usagers qui cheminent dans le sens favorable vis-à-vis de l'évacuation; en effet, en l'absence de visibilité, certains d'entre eux peuvent cheminer vers le danger sans en prendre conscience – pour fixer les idées, on pourra retenir l'hypothèse que 50% des usagers en moyenne cheminent dans le bons sens).

Pour calculer le nombre d'usagers, on prendra un même taux d'occupation moyen des véhicules (hors autocars) pour tous les tunnels de 1,5 personnes.

<sup>2</sup> Vitesse de marche les yeux bandés, cf. AIPCR 1999.



# Table des matières

A

## Partie A - Le rôle de l'étude spécifique des dangers dans le dossier de sécurité 3

1

Nature de l'étude 3

2

Place de l'étude dans le dossier de sécurité 4

3

Recommandations aux maîtres d'ouvrage et aux exploitants 6

3.1. Le maître d'ouvrage et l'exploitant doivent s'impliquer fortement 6

3.2. Il ne doit pas y avoir d'ambiguïté sur les caractéristiques de l'état de référence pris en compte 7

3.3. Les outils de modélisation doivent être utilisés avec discernement 7

3.4. L'ESD doit être un document pédagogique «fondateur» 8

B

## Partie B - Méthodologie et contenu de l'ESD 9

1

Présentation du tunnel et de son environnement 9

2

Description fonctionnelle du tunnel 10

3

Identification des dangers et choix des scénarios 11

3.1. Définitions 11

3.2. Identification des dangers 11

3.3. Choix des événements déclenchants 12

3.4. Choix des scénarios associés aux événements déclenchants 13

4

Étude des scénarios 14

4.1. Déroulement d'un scénario 14

4.2. Éléments standardisés pour l'étude des scénarios 15

4.3. Représentation du mouvement des fumées 17

5

Synthèse 18

## Annexes

A

Liste guide pour l'identification des dangers A.1 à A.4

B

Éléments pour l'appréciation des risques d'accidents et d'incendies B.1 à B.4

C

Standardisation des termes sources d'incendie et MD C.1 à C.12

D

Spécifications pour la modélisation du mouvement des fumées D.1 à D.8

E

Modélisation du comportement des usagers E.1 à E.2

À la demande du comité d'évaluation de la sécurité des tunnels routiers (CESTR), le centre d'Etudes des Tunnels (Cetu) a constitué un groupe de travail afin de produire un guide destiné à l'ensemble des personnes concernées par les dossiers de sécurité des tunnels routiers.

Ce groupe de travail a été composé de représentants du Cetu, de la Mission Transports des Marchandises Dangereuses de la Direction des Transports Terrestres (DTT-MTMD), de l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (Ineris), de bureaux d'études, de maîtres d'ouvrage et d'exploitants, certains participants étant également membres du CESTR. Le Centre de Gestion Scientifique de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris (CGS-ENSMP) a apporté un soutien méthodologique et opérationnel au groupe ainsi constitué.

Les travaux de ce groupe se sont notamment appuyés sur une analyse détaillée confiée au bureau d'études Docalogic Inflow concernant les modalités d'élaboration et le contenu d'études spécifiques des dangers (ESD) réalisées pour plusieurs tunnels routiers français représentatifs.

*On trouvera ci-après la liste des participants aux réunions du groupe:*

*Michel Vistoroky (Area), Pierre Kobler (Bonnard et Gardel SA),  
Yves Trottet (Bonnard et Gardel S.A.), Éric Cesmat (CSTB),  
Pascal Beria (DDE 13), Marilou Marti (DDE 13),  
Philip Berger (Docalogic Inflow), Romain Cailleton (DTT-MTMD),  
Daniel Fixari (ENSMP-CGS), Philippe Cassini (Ineris),  
Raphaël Defert (Ineris), Emmanuel Plot (Ineris), Emmanuel Ruffin (Ineris),  
Johann Lecointre (Ligeron SA), Philippe Pons (Ligeron SA),  
Eric Boisguerin (Scetauroute), Anne-Sophie Graipin (Scetauroute),  
Michel Legrand (Scetauroute), Pierre Merand (Scetauroute),  
Raymond Vaillant (Setec TPI), Pierre Carlotti (Cetu), François Demouge (Cetu),  
Nelson Gonçalves (Cetu), Didier Lacroix (Cetu), Claude Moret (Cetu),  
Michel Pérard (Cetu), Philippe Sardin (Cetu), Marc Tesson (Cetu).*

## Guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers :

- Fascicule 0 Finalités du dossier de sécurité
- Fascicule 1 Modalités d'élaboration du dossier de sécurité
- Fascicule 2 Tunnels en exploitation  
«de l'état des lieux à l'état de référence»
- Fascicule 3 Les études des risques liés au transport  
des marchandises dangereuses
- ■ Fascicule 4 **Les études spécifiques des dangers (ESD)**
- Fascicule 5 Le plan d'intervention et de sécurité (PIS)

25, avenue  
François Mitterrand  
Case n°1  
69674 Bron Cedex  
téléphone:  
33 (0)4 72 14 34 00  
télécopie:  
33 (0)4 72 14 34 30  
mél: cetu  
@equipement.gouv.fr  
internet:  
www.equipement.  
gouv.fr/cetu

Pièce maîtresse du dossier de sécurité, l'étude spécifique des dangers (ESD) prend en compte le tunnel comme un système global, constitué par les usagers, l'ouvrage lui-même avec ses équipements et son environnement, l'exploitant et les services d'intervention et de secours.

Ce fascicule a été conçu pour apporter des éléments utiles à la réalisation de l'ESD, à la fois aux personnes directement impliquées dans les décisions concernant la sécurité en tunnel et aux bureaux d'études.

*C'est à la demande du comité d'évaluation de la sécurité des tunnels routiers (CESTR) que le centre d'Études des Tunnels (Cetu) a constitué un groupe de travail qui a élaboré le présent fascicule.*