

Méthode d'évaluation des conséquences d'un incendie en tunnel par le couplage de modèles de dispersion de fumées et d'un modèle d'évacuation des usagers

F. Waymel
INERIS
Parc Technologique ALATA
BP 2
60550 Verneuil en Halatte
Tél. : 03-44-55-69-80
frederic.waymel@ineris.fr

RESUME

Les travaux présentés dans cet article ont été réalisés dans le cadre de la procédure d'analyse de risque UPGRADE développée dans le projet européen UPTUN. Ils ont permis de développer une nouvelle méthode d'évaluation de risque en tunnel basée sur le couplage de modèles de dispersion de fumées et d'un modèle d'évacuation. Deux types de modèles sont proposés dans le calcul de la dispersion de fumées : un modèle d'équilibrage de réseau NewVendis permettant de calculer la dispersion globale sur l'ensemble du réseau de ventilation et, un code à zone FASIT permettant d'affiner le calcul à proximité du foyer et de prendre en compte notamment les phénomènes de stratification. Les conditions de tenabilité calculées par ces modèles sont ensuite injectées dans le modèle CRISP pour le calcul du scénario d'évacuation. L'ensemble des résultats (dispersion et évacuation) sont combinés dans un diagramme de tenabilité correspondant à la superposition espace / temps d'une variable de tenabilité (température, concentration en toxique...) et de la position des usagers dans le tunnel. Cette représentation permet une interprétation des causes de blessés ou de décès et facilite ainsi le choix des mesures de sécurité efficaces à adopter pour améliorer le niveau de sécurité du tunnel à l'étude.

1. Introduction

Le retour d'expérience sur les situations accidentelles en tunnels montre que les conditions de dispersion de fumées d'incendie ou de substances toxiques et en particulier les phénomènes de stratification sont d'une importance capitale pour la sécurité. La maîtrise de l'ambiance thermo-aéraulique à proximité d'un incendie revêt un caractère particulièrement important dans les tunnels (routier ou ferroviaires) puisqu'il s'agit de produire localement des conditions favorables à l'évacuation des personnes et à l'action des secours. Ceci est également vrai pour d'autres domaines industriels confinés tels que les stockages souterrains, les entrepôts, les parkings, les mines et carrières...

La difficulté lors de l'évaluation des conséquences d'un phénomène accidentel tel que le incendie en tunnel repose à la fois sur une représentation fine de la dispersion de fumées et également sur leur impact au niveau des usagers. Cette dernière notion nécessite d'introduire certains aspects dans l'analyse des conséquences tels que l'impact des toxiques sur l'homme et le comportement des individus en situation d'urgence. Concernant cette dernière thématique, l'état de l'art et les connaissances actuelles sont limités. Toutefois, elle fait partie des objectifs de recherche actuels notamment par le développement des approches de type Ingénierie de la Sécurité Incendie. Des modèles de déplacement de foules sont notamment développés auxquels sont greffés des comportements type

d'individus sur la base de l'état actuel de la connaissance sur la psychologie des personnes en situation d'urgence.

L'objectif principal de la méthode proposée s'inscrit dans le cadre de l'amélioration de l'évaluation des conséquences des risques accidentels en tunnel et milieux souterrains de manière générale. L'amélioration proposée porte sur une évaluation plus précise des doses thermiques et toxiques reçues par chaque individu sur les chemins d'évacuation empruntés. La problématique repose sur l'utilisation d'outils adéquats permettant de décrire de manière fine et robuste les phénomènes de dispersion et les déplacements de foule en situation d'urgence. Cette problématique nécessite notamment de prendre en compte les paramètres importants qui constituent les systèmes de transport souterrains et qui pourraient avoir un effet notable sur les conséquences des scénarios accidentels qui sont évalués. Le facteur temps étant indispensable dans l'évaluation des conséquences, il est de ce fait indispensable de prendre en compte les temps de réponse des systèmes qui peuvent potentiellement jouer un rôle dans l'évolution des scénarios accidentels.

2. Description de la méthodologie

La philosophie de la méthode repose sur une approche de type déterministe pour l'évaluation du niveau de sécurité des tunnels. Cette évaluation est basée sur l'analyse de scénarios pertinents dont le nombre peut dépendre de plusieurs paramètres tels que :

- la puissance de l'incendie,
- la position de l'incendie,
- les conditions atmosphériques aux têtes du tunnel,
- les conditions de trafic (pistonement et influence sur la stratification [Waymel et al., 2005]),
- le système de ventilation,

2.1 Description sommaire de la méthode de couplage

La méthode consiste à coupler de manière successive sans couplage rétroactif ou successif des outils de calcul adaptés à la problématique des tunnels suivant les étapes présentées sur le schéma de la Figure 1 [Waymel and al., 2006].

Pour chaque incendie simulé, le scénario est traité d'après les étapes chronologiques suivantes :

1. calcul 1D de l'aérage global. Ce calcul fournit les conditions de tenabilité sur l'ensemble du réseau,
2. calcul dans le champ proche de l'incendie si nécessaire (stratification possible). Pour ce calcul, les conditions aux limites de vitesses sont fournies par le calcul de l'aérage global,
3. compilation des données de calcul de la dispersion de fumées. Dans la zone non stratifiée, les paramètres de tenabilité retenus sont ceux calculés par le modèle 1D. Dans la zone stratifiée, les paramètres retenus sont ceux calculés à hauteur d'homme par le code de calcul en champ proche,
4. calcul de l'évacuation à partir des conditions de tenabilité calculées par les modèles de dispersion et à partir de la position initiale des usagers donnée par le modèle de calcul de trafic implémenté dans NewVendis
5. construction des diagrammes de tenabilité. Ces diagrammes correspondent à une représentation espace / temps permettant de synthétiser les résultats de calcul de la dispersion de fumées et du scénario d'évacuation. Ils correspondent à la superposition de l'évolution espace / temps d'une variable de tenabilité et de la trajectoire des usagers. Cette représentation permet une interprétation aisée des cas de blessés ou de décès,

- Analyse des diagrammes de tenabilité, quantification du niveau de sécurité du tunnel et adaptation de mesures de sécurité si nécessaire pour définir un nouvel état de référence du tunnel.

Les données nécessaires aux différents calculs sont fournies par une base de données constituant l'état de référence du tunnel.

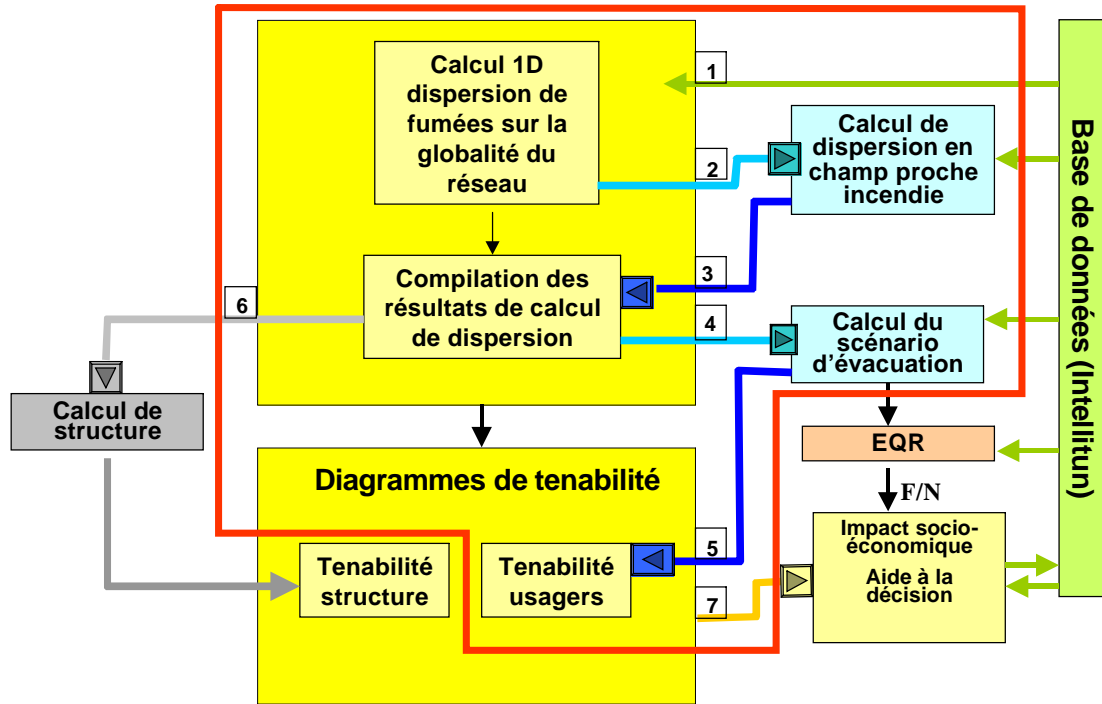


Figure 1 : méthode de couplage des outils pour l'évaluation des conséquences

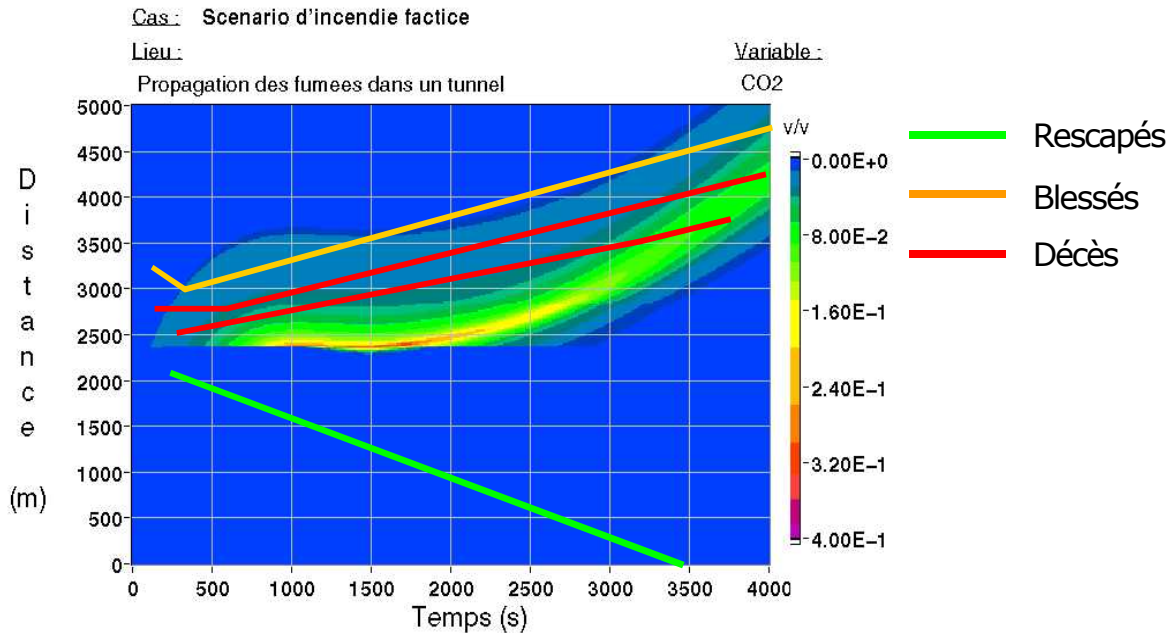


Figure 2 : exemple de diagramme de tenabilité

2.2 Choix des modèles

Le nombre potentiel de scénarios à étudier peut être dans certains cas être élevé en raison du nombre important de paramètres d'influence. Pour cette raison, il a été exclu dans la méthode proposée d'utiliser pour la modélisation de la dispersion des fumées des outils de simulation de type CFD dont le coût et le temps d'utilisation pourraient s'avérer trop importants dans le cadre d'études d'ingénierie bien qu'ils représentent finement les phénomènes de stratification. Toutefois, la méthode n'exclut pas entièrement l'usage de ce type d'outils de simulation car elle reste ouverte à l'intégration de modèles plus complexes pour des études spécifiques ou des modèles plus performants qui pourraient être développés dans le futur.

Il est également important de considérer le système tunnel de manière la plus exhaustive possible afin de prendre en compte l'ensemble des paramètres qui peuvent influencer la dispersion des fumées. Les modèles complexes 3D ne sont pas prévus pour de telles applications spécifiques.

Afin de prendre en compte la complexité du système tunnel et la stratification des fumées, la méthode retenue pour la modélisation de la dispersion de fumées repose donc sur le couplage de deux types d'outils :

2.2.1 Le modèle 1D de calcul d'aéragé

Ce type de modèle a la spécificité de pouvoir prendre en compte l'ensemble des systèmes constituant le réseau de ventilation tels que les ventilateurs, les accélérateurs, les gaines de ventilation, les trappes de désenfumage et les résistances aérauliques du réseau. Ce type de modèle est ainsi capable de fournir avec une bonne précision la répartition des débits dans le réseau et, par conséquent, de calculer la dispersion des fumées sur la globalité du tunnel. En revanche, en raison de l'approche unidimensionnelle, il ne permet pas de prendre en compte les phénomènes de stratification.

Le modèle utilisé dans le cadre du projet est le modèle NewVendis développé par l'INERIS [Daéron and al., 2000]. Le réseau de ventilation est décrit par un ensemble de galeries. Chaque galerie est caractérisée par sa longueur curviligne, sa section, son diamètre hydraulique et son coefficient de pertes de charge linéique. Des points de discrétisation internes peuvent être ajoutés pour affiner le maillage et améliorer la précision des calculs de dispersion des toxiques.

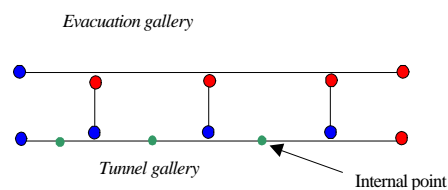


Fig. 3 : tunnel network representation in NewVendis

Le calcul instationnaire des vitesses dans le réseau est basé sur l'introduction d'effets de pression dans le modèle. Ces effets sont :

- les pertes de charge singulières,
- les conditions atmosphériques,
- les systèmes de ventilation,
- le pistonnement des véhicules.

Le calcul de l'équilibrage aéraulique du réseau consiste à résoudre les équations de conservation de la masse et de champs de pression à l'aide de la méthode de Hardy-Cross [Hardy-Cross, 1936]

Le calcul du transfert de chaleur et de masse est quant à lui basé sur un modèle de diffusion. Chaque espèce est convectée dans le tunnel à la vitesse calculée par la méthode en amont par l'équilibrage du réseau.

2.2.2 Le modèle à zone

Pour la zone proche de l'incendie où la stratification est possible, un compromis a été réalisé entre temps de calcul et précision de la modélisation du phénomène. Ce compromis a abouti à l'utilisation d'un code à zone basé sur une approche bidimensionnelle du tunnel.

Le modèle utilisé dans le projet est le modèle FASIT [Charters and al., 1994]. Dans ce modèle, le tunnel est représenté par une série de zone dont la longueur et la position peuvent être entrées manuellement par l'utilisateur ou de manière automatique avec une distribution longitudinale exponentielle dont l'origine est le foyer de l'incendie. Ce modèle à zone est un modèle à trois couches particulièrement adapté à la problématique de la stratification en tunnel :

- une couche froide,
- une couche de mélange,
- une couche chaude.

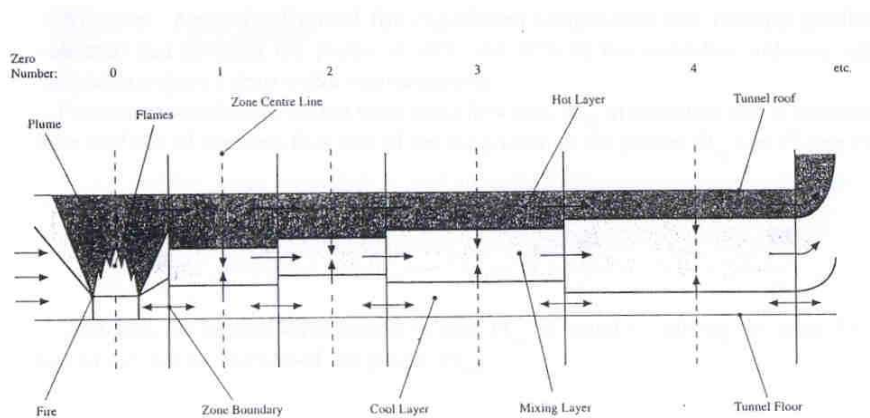


Fig. 4 : FASIT - représentation schématique des zones

FASIT permet de prédire sur chaque zone et à différents instants la température, la vitesse, la hauteur et la concentration en toxique à partir d'une puissance d'incendie et une vitesse longitudinale données par l'utilisateur. Ce calcul est réalisé à partir de la résolution des équations de conservation de masse et d'énergie. Les échanges de quantités de mouvement entre les couches sont évalués sur la base de lois empiriques validées par des données expérimentales.

2.2.3 Le modèle d'évacuation

Le modèle d'évacuation employé est le modèle CRISP développé par le BRE [Fraser-Mitchell, 1994]. Ce modèle a été à l'origine développé pour modéliser les incendies dans les bâtiments puis, il a été adapté pour traiter le cas des tunnels. Le tunnel est représenté par un

ensemble de segment, chaque segment faisant partie de la zone d'évacuation. Cet outil est doté d'un modèle à zone à deux couches pour le calcul de la dispersion de fumées. Il n'est pas utilisé dans la méthode développée car peu adapté au cas des tunnels.

CRISP contient un modèle détaillé pour le comportement humain. Le calcul du risque est en effet basé sur le calcul des doses thermiques et toxiques reçues par chaque individu en utilisant la méthode FED (Fractional Effective Dose) [Purser, 1994]. Cette méthode nécessite de connaître à chaque instant la position des personnes et le temps de séjour dans une ambiance donnée. Pour le cas des tunnels, il est indispensable de connaître la position de chaque individu par rapport au foyer tout au long du scénario d'incendie. CRISP est ainsi pourvu d'un modèle de déplacement de foule dont les trajectoires des individus peuvent être conditionnées par des comportements psychologiques types basés sur le retour d'expérience (réactivité au alerte, comportements de groupe, vitesses de déplacement en fonction des conditions ambiantes...).

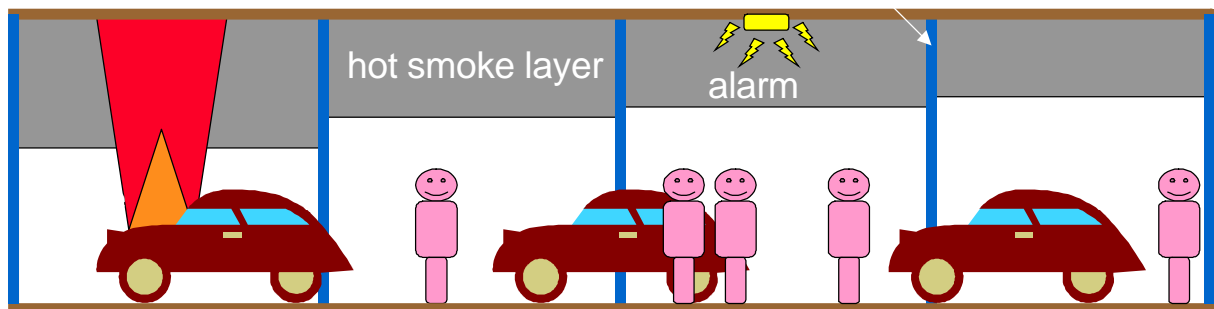


Fig. 5 : Représentation schématique des objets dans le modèle CRISP

3. Application

3.1 Tunnel simple avec une ventilation longitudinale

Ce tunnel bidirectionnel a une longueur de 1km et une section de 63 m².

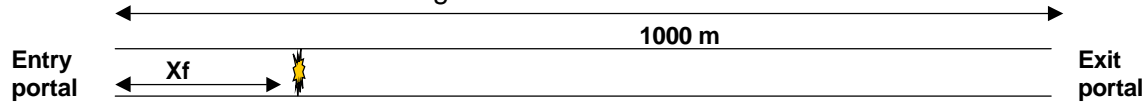


Figure 6 : Géométrie du tunnel

Deux puissances d'incendie ont été étudiées sur la base des courbes standardisées utilisées en Suisse.

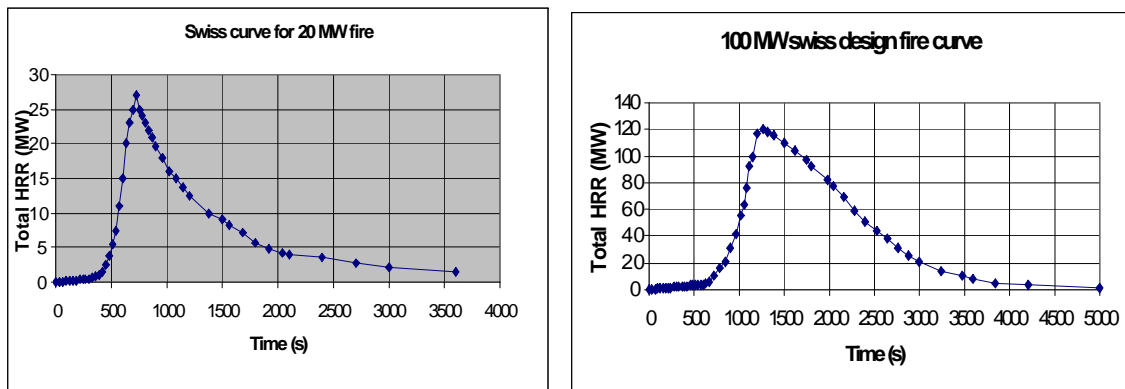
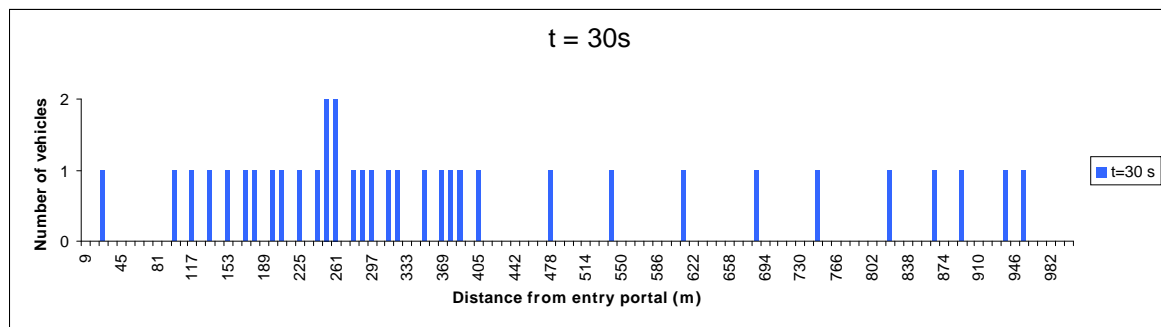


Figure 7 : puissances d'incendie pour le cas traité

Une différence de pression de 15 Pa entre les têtes du tunnel a été appliquée afin de simuler un courant d'air naturel longitudinal de 3 m/s environ.

La densité de trafic est de 1000 véh./h par direction (70% voitures, 20% camions, 10% bus). La vitesse des véhicules est de 70 km/h avant l'incendie. L'incendie est à l'origine de la formation d'un bouchon calculé par le modèle de trafic de NewVendis. L'évolution du trafic jusqu'à l'arrêt complet est représentée sur les figures suivantes pour le cas d'un incendie à 250 m de l'entrée du tunnel.



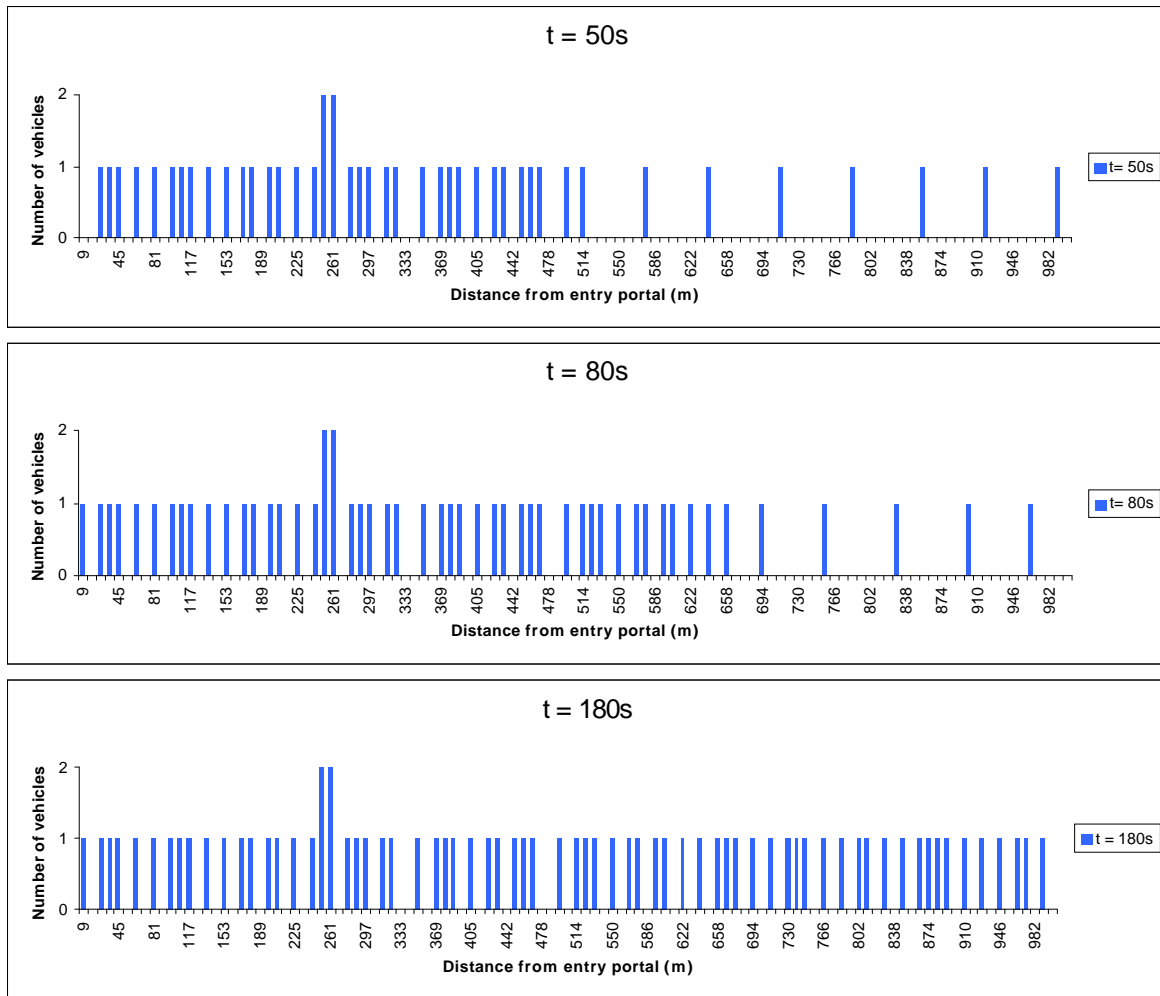


Figure 8 : Evolution du trafic dans le tunnel jusqu'à l'arrêt complet des véhicules de part et d'autre de l'incendie

Les résultats présentés ci-après sont basés sur les conditions de tenabilité thermique et toxiques calculées par les modèles de dispersion de fumées. Les scénarios d'évacuation ont été calculés pour quatre options d'équipements de sécurité dédiés à l'évacuation :

1. pas d'issue de secours ni d'alarme : seules les entrées du tunnel offrent une issue de secours aux usagers. Chaque usager commence à évacuer dès qu'il perçoit les fumées (chute de la visibilité),
2. pas d'issue de secours mais présence d'une alarme : les usagers commencent à évacuer simultanément dès le déclenchement de l'alarme 3 minutes après le début de l'incendie,
3. issues de secours tous les 200 m mais pas d'alarme,
4. issues de secours et alarme.

Les diagrammes de tenabilité sont présentés pour le cas d'un incendie de 100 MW à 250 m de l'entrée. Les lignes blanches correspondent aux trajectoires des personnes sauvées incluant les blessés. Les lignes noires correspondent aux trajectoires des usagers qui décèdent durant la phase d'évacuation.

Les résultats montrent que la présence d'issues de secours tous les 200 m n'est pas suffisante pour garantir l'absence de décès. En effet, certains usagers n'empruntent pas les issues soit pour tenter de rejoindre la sortie du tunnel (comportements identifiés sur le retour

d'expérience) ou soit par manque de visibilité. Ces personnes sont alors amenées à évacuer dans des conditions insoutenables.

En revanche, un système d'alarme à lui seul peut avoir un effet très bénéfique pour l'évacuation des usagers. Il permet en effet d'assurer une évacuation précoce de manière à éviter que les usagers ne se retrouvent dans les fumées. Cette conclusion reste toutefois valable à condition que toutes les personnes réagissent dans l'immédiat au système d'alerte.

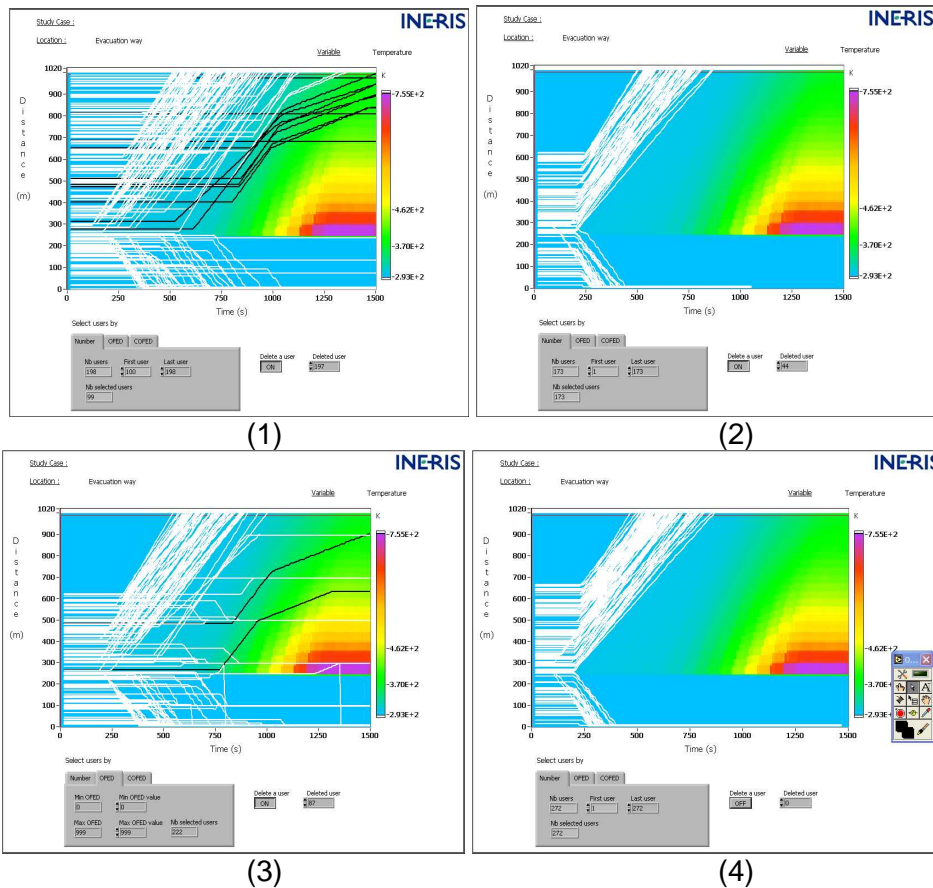


Figure 9 : Diagrammes de tenabilité

3.2 Tunnel alpin en ventilation transversale

Le tunnel étudié est un tunnel bidirectionnel de 1600 m de long. La hauteur est de 4.98 m pour une section de 59.9m².

Il comporte deux gaines de ventilation en partie supérieure. Chaque gaine peut être utilisée pour l'amenée d'air frais ou l'extraction de fumées grâce à des ventilateurs réversibles situés dans deux usines de ventilation disponibles aux têtes du tunnel (56 m³/s en soufflage – 31m³/s en extraction). Chaque gaine est divisée en deux cantons de longueurs égales. Des trappes de désenfumage de 0.8x2.5 m sont positionnées tous les 200 m.

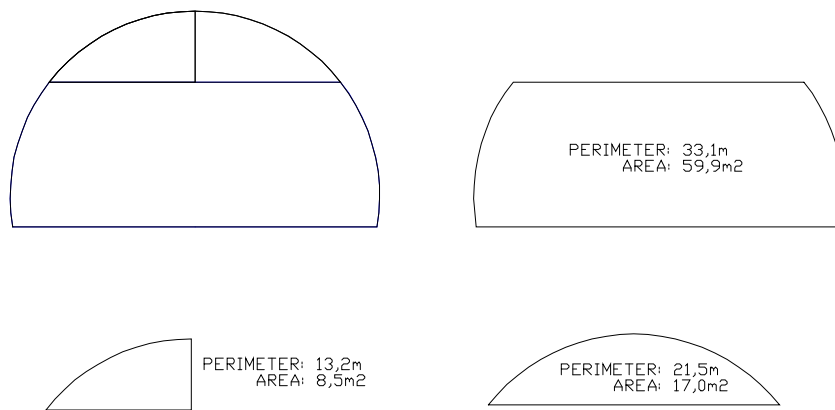


Figure 10 : section du tunnel

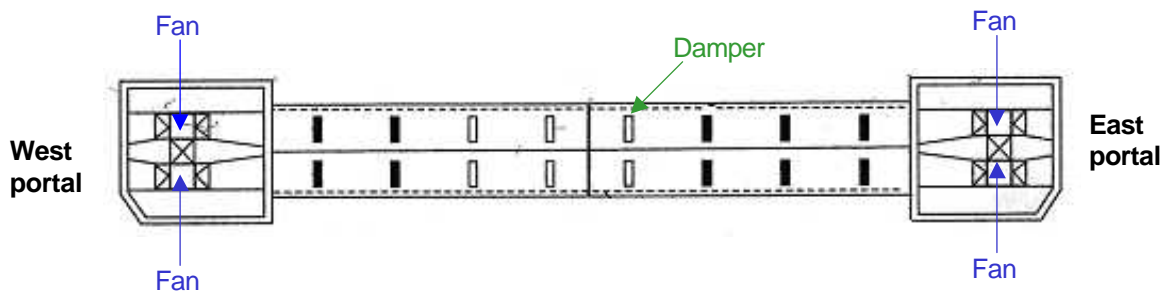


Figure 11 : gaines de ventilation

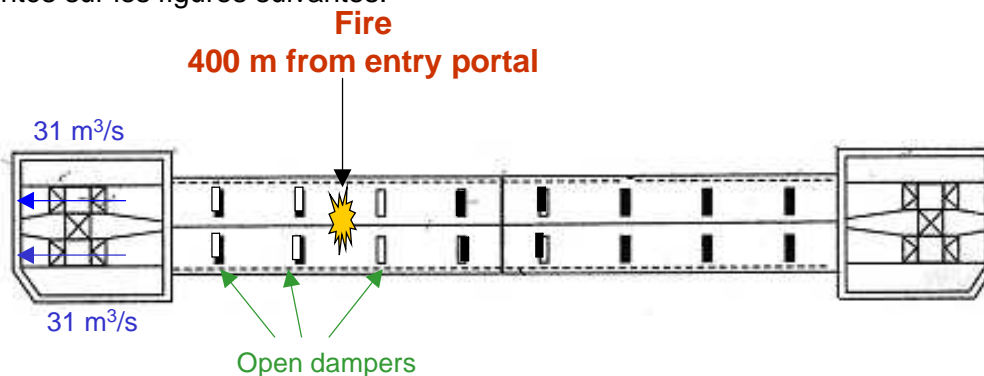
La pente est de 1.5% sur les 1490 premiers mètres et de 0.9 % sur la partie restante du tunnel.

Trois positions d'incendie ont été envisagées :

- 400 m de l'entrée (1/4 du tunnel)
- 800 m de l'entrée (1/2 du tunnel)
- 1200 m de l'entrée (3/4 du tunnel)

Les puissances retenues sont identiques à celle du 1^e cas d'étude.

Les scénarios d'ouverture de trappes pour les différentes positions d'incendie étudiées sont représentés sur les figures suivantes.



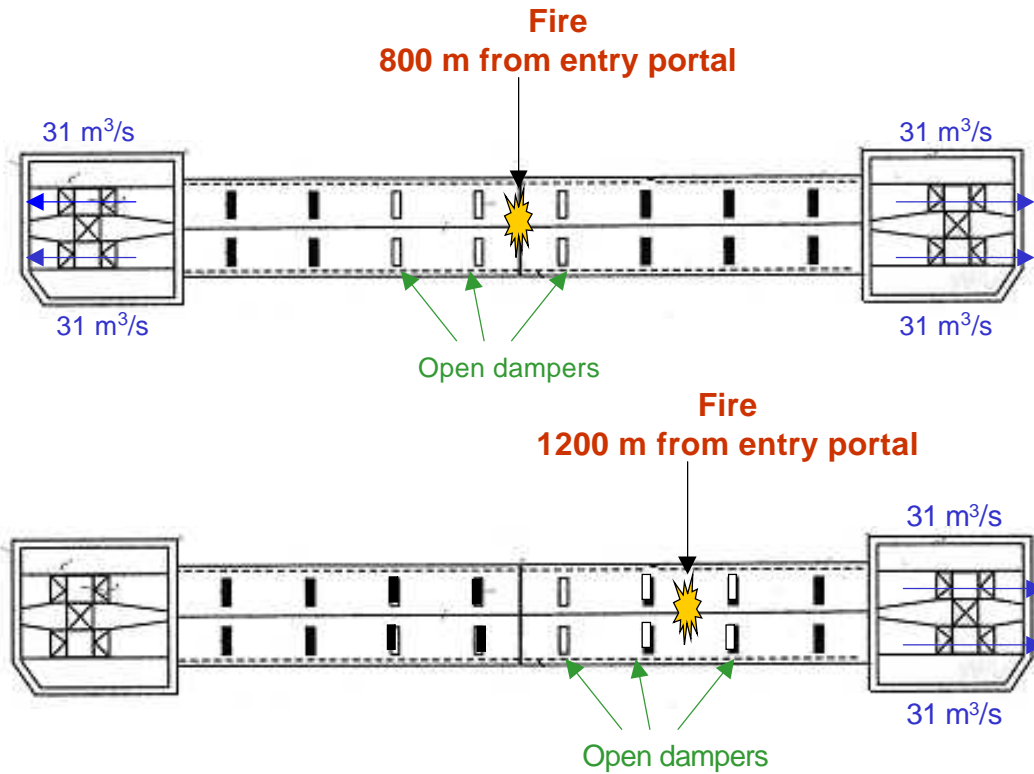


Figure 12 : scénarios de ventilation pour les trois positions d'incendie étudiées

Pour intégrer le temps de détection de l'incendie, les ventilateurs sont activés 3 minutes après le début de l'incendie et atteignent leur vitesse de pointe en 1 minute.

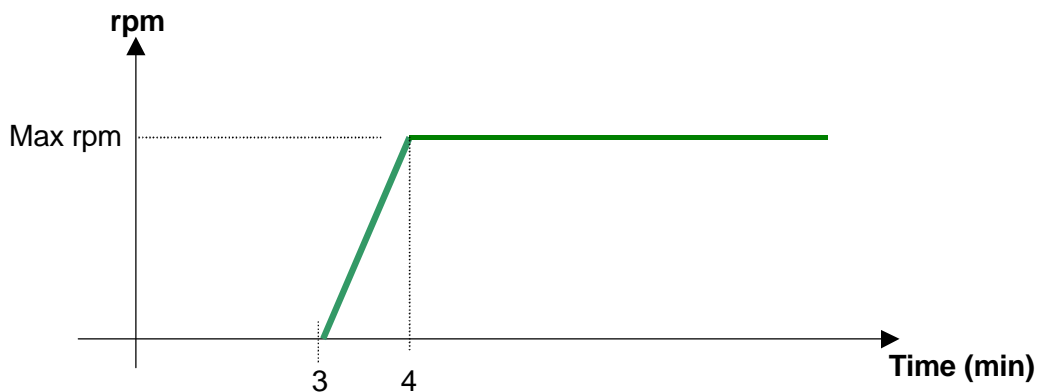


Figure 13 : Temps de réponse des ventilateurs

Le trafic est composé de 80% de voitures, 15% de camions et 5% de bus. La densité est 722 veh./h dans le sens Ouest-Est est de 514 veh./h dans le sens Est-Ouest. La vitesse est de 70 km/h. Le trafic est bloqué au niveau de l'incendie au temps $t = 0s$ et l'accès au tunnel est fermé 3 minutes après le début de l'incendie.

Les figures suivantes montrent l'évolution du trafic pour un incendie au milieu du tunnel.

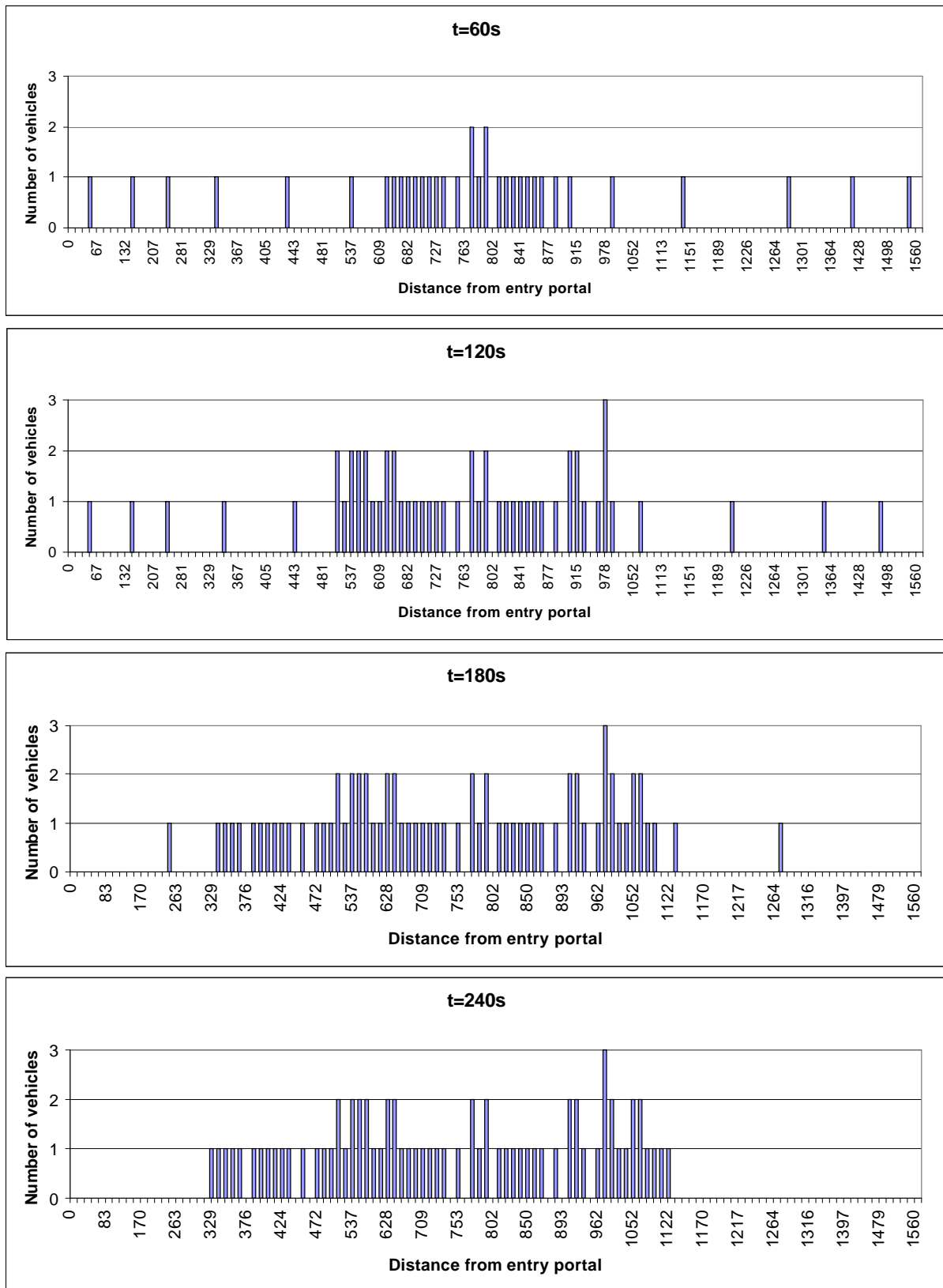


Figure 14 : évolution du trafic dans le cas d'un incendie à 800 m de l'entrée

La Figure 15 et la Figure 16 correspondent aux diagrammes de tenabilité d'un incendie de 100 MW à 400 m et à 800 m de la porte Ouest. Les conséquences sont plus dramatiques

pour le cas à 400 m de l'entrée car la vitesse de dispersion des fumées est plus importante (effet cheminée plus prononcé) et la distance à parcourir pour sortir du tunnel pour les usagers situés à l'aval du foyer est plus grande. Les conséquences sont de 50 blessés et 32 décès pour l'incendie à 400 m de l'entrée et de 17 blessés et 7 décès pour l'incendie à 800 m de l'entrée. Ces résultats montrent en particulier que les capacités du système de désenfumage sont insuffisantes pour garantir des conditions d'évacuation saines pour de telles puissances d'incendie.

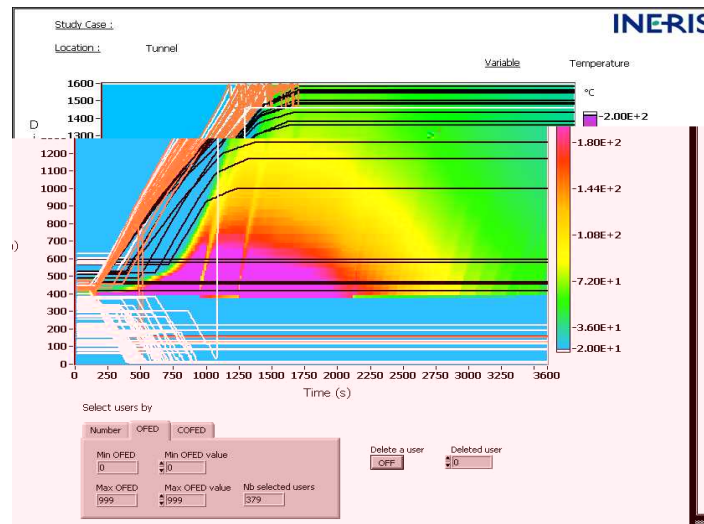


Figure 15 : diagramme de tenabilité pour un incendie de 100 MW à 400 m de l'entrée

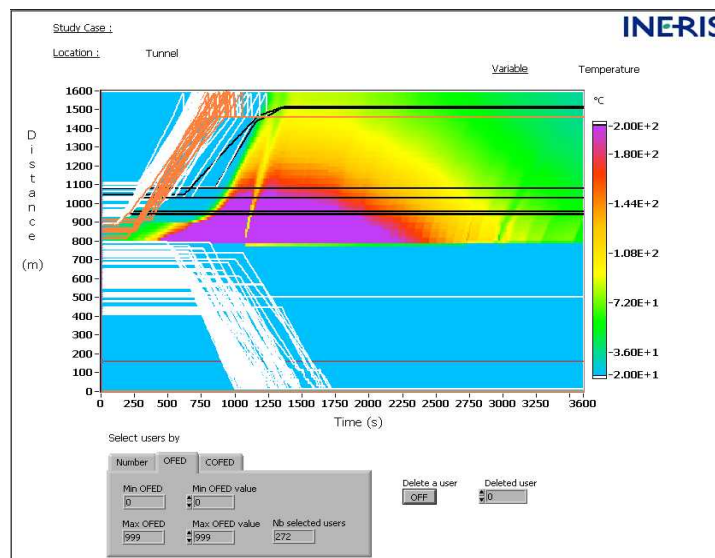


Figure 16 : diagramme de tenabilité pour un incendie de 100 MW à 800 m de l'entrée

4. Conclusions et perspectives

La méthode d'évaluation de risque développée dans le cadre du projet UPTUN permet de prendre en compte l'interaction entre la propagation des fumées, la stratification et le comportement des usagers. Cette procédure d'évaluation s'adapte bien au cas des tunnels en particulier grâce au choix des modèles utilisés. Elle peut être appliquée en l'état pour répondre aux exigences de la directive européenne sur la sécurité des tunnels routiers. L'interaction entre les différents modèles est assurée par une procédure simple d'échange

de données. Les diagrammes de tenabilité présentés pour les deux cas d'application démontrent l'intérêt d'une telle méthode. Les résultats présentés montrent en effet de façon claire l'interaction entre les conditions de tenabilité et le déplacement des usagers. Il est de ce fait plus évident de comprendre les causes d'intoxication ou de décès et de proposer ainsi de manière efficace les équipements à mettre en œuvre pour améliorer le niveau de sécurité du tunnel à l'étude.

Enfin, il serait intéressant de généraliser cette méthode en mettant également en œuvre des outils de calcul plus complexes et adaptés à d'autres ouvrages que les tunnels dans le cadre de l'Ingénierie de la Sécurité des Incendies (ISI).

5. Références citées

Charters, A., C., Gray, W.A., McIntosh, A., C., « A computer Model to Assess Fire Hazards in Tunnels (FASIT), Fire technology, first Quarter 1994, pp134-154.

Daëron S., Ruffin E. "Calculations of fire smoke behaviour in long rail tunnels", Tunnel and Underground Station Fires, Hong Kong, Mai 2000.

Fraser-Mitchell, J.N., "An Object-Oriented Simulation (CRISP 2) for Fire Risk Assessment", Fire Safety Science, Proc 4th Int Symp IAFSS, p.793-804 (1994)

H. Cross, "Analysis of flow in networks of conduits or conductors", Bull. Ill. Engng. Exp. Sta No. 286, Urbana, 1936, 29p.

Purser, D. A., 1994, "Hazard perception and behavioural response of people to smoke exposure in accidental fires – report on preliminary case investigations". Building Research Establishment Ltd, UK

Waymel F., "INERIS contribution of WP5 of UPTUN project", European commission, 2006

Waymel F., Fraser-Mitchell J., Ruffin E., « A new risk assessment procedure integrating smoke dispersion and evacuation model », 2nd International Symposium on Tunnel Safety and Security, Madrid, March 15-17 2006

Waymel F., Fournier L., Ruffin E., « Etude numérique de l'influence de véhicules sur la déstratification des fumées d'un incendie en tunnel », Congrès international AFTES, Chambéry, 2005