

RISQUE D'INCENDIE EN TUNNEL L'AUTOMATISATION DU CONTROLE DE LA VENTILATION APPLICATION AU TUNNEL SOUS LE MONT BLANC

E. Casalé
SCETAUROUTE Département Tunnels et Travaux Souterrains
Annecy, France
e.casale@scetauroute.fr

RESUME

En 1999, le groupe de travail n°6 « Incendie et désenfumage » du Comité des Tunnels Routiers (C5) de l'AIPCR a produit un document intitulé « Maîtrise des incendies dans les tunnels routiers ». Les directives relatives au pilotage de la ventilation mentionnent le contrôle d'une phase d'évacuation suivie d'une phase de lutte contre l'incendie.

Dans le cadre de la rénovation du tunnel sous le Mont Blanc, ces recommandations sont à la base des automatismes de pilotage du système de ventilation.

Lors de la phase d'évacuation, le caractère bidirectionnel du trafic conduit à contrôler les conditions de développement de la stratification naturelle des fumées chaudes. Cet objectif est atteint en associant le fonctionnement d'accélérateurs à l'activation d'une capacité d'extraction centrée sur l'incendie, une fois que la localisation de celui-ci a été validée par l'opérateur.

Ce système, entièrement automatique, a été testé lors d'essais en vraie grandeur en janvier 2002. Les résultats sont exceptionnels puisque, lors des feux les plus puissants (8 MW), l'extension maximale des fumées (parfaitement stratifiées) a été de 300 m. Ces essais ont joué un rôle essentiel dans la décision de remise en service de l'ouvrage.

La publication décrit sommairement le tunnel sous le Mont Blanc et son système de ventilation. Elle donne les fondements scientifiques du développement de la stratification. Elle donne enfin une description des essais en vraie grandeur et synthétise les interprétations des mécanismes qui ont été observés à cette occasion.

MOTS CLÉS

TUNNEL / INCENDIE / VENTILATION / AUTOMATISATION / STRATIFICATION

1 PRESENTATION DU TUNNEL SOUS LE MONT BLANC

1.1 Les conclusions de la catastrophe du 24 mars 1999

Le tunnel sous le Mont Blanc est un ouvrage long de 11,6 km. Il relie la France et l'Italie entre les vallées de Chamonix et de Courmayeur. Il reçoit un trafic bidirectionnel composé d'une forte proportion de poids lourds.

Le 24 mars 1999, l'incendie d'un poids lourd dans le tunnel sous le Mont Blanc provoque la mort de 39 personnes, ainsi que des dégâts très importants. L'incendie s'est propagé à de nombreux poids lourds retenus dans le tunnel. Il a duré plus de deux jours.

Cet événement a été fortement médiatisé parce que le tunnel sous le Mont Blanc est un ouvrage essentiel reliant la France et l'Italie et parce que sa gravité met en lumière des processus particuliers de transfert des atmosphères dangereuses. Ces processus ont ensuite été observés lors des catastrophes des tunnels du Tauern en Autriche et du Gotthard en Suisse.

De façon synthétique, ces événements ont montré que l'incendie d'un poids lourd transportant des matières non classées dangereuses est susceptible de produire des dégagements thermiques et toxiques très importants.

Par ailleurs, le confinement imposé par le tunnel permet de transporter ces conditions dangereuses sur de grandes distances, sans les altérer.

Enfin, ces événements ont montré qu'une gestion inappropriée du système de ventilation contribue à aggraver les conséquences de l'incendie, notamment dans les premiers instants de l'événement.

1.2 La rénovation du tunnel

A la suite de cette catastrophe, il est apparu que les travaux de réhabilitation devaient comprendre une rénovation profonde des systèmes de sécurité et du système de ventilation en particulier.

Les études et les travaux de rénovation ont été confiés au groupement SCETAURROUTE-SPEA par les sociétés du tunnel ATMB (France) et SITMB (Italie). Un Comité de Sécurité bi-national est chargé de produire les recommandations spécifiques et de suivre la réalisation des travaux de rénovation.

Les travaux ont nécessité l'activité de près de mille personnes pendant les périodes les plus complexes du chantier. Les travaux ont duré deux années. L'ouverture du tunnel a eu lieu en mars 2002.

L'exploitation du tunnel rénové est assurée par un groupement européen (GEIE) franco-italien qui a été impliqué dans le suivi des études et des travaux.

2 LE SYSTEME DE VENTILATION RENOVE

2.1 Les recommandations et quelques conséquences pratiques

Le Comité de Sécurité a édité des recommandations basées sur la Circulaire Ministérielle 2000-63 produite par les ministères français de l'Intérieur et des Transports en 2000.

Les dispositions nouvelles mentionnées par ce texte sont les suivantes :

- La création d'abris sécurisés et pressurisés tous les 300 m ;
- La création d'une voie d'évacuation sécurisée et pressurisée, connectée à ces abris ;
- L'accroissement des débits d'extraction de fumées
- La création de carreaux de désenfumage équipés de trappes télécommandables et motorisées, espacés de 100 m. Les carreaux en place étaient espacés de 300 m.

En fait, l'intégration de ces contraintes a conduit à des dispositions innovantes puisqu'il était impossible d'accroître les dimensions de l'ouvrage existant alors que les capacités globales devaient être accrues (Guigas et al., 2001).

2.2 Le système de ventilation en air frais

Ce système est composé de huit gaines spécifiques alimentées par autant de ventilateurs centrifuges (4 côté France et 4 côté Italie). Chaque conduit comporte un tronçon de transit auquel succède un tronçon de diffusion.

Pour tenir compte de nouveaux seuils admissibles plus sévères pour la ventilation sanitaire, la capacité du système de ventilation d'air frais est portée de 75 m³/s à 83 m³/s pour chacun des huit cantons de soufflage.

Par ailleurs, ce dispositif est également utilisé pour alimenter les abris en air frais pendant l'incendie et pour évacuer les usagers vers l'extérieur. Ces nouvelles fonctions se traduisent par la mise en communication des différentes gaines pendant la phase

d'évacuation. Elle conduit à des déséquilibres aérauliques importants dont le risque essentiel est le défaut d'alimentation en air frais des refuges alimentés par les extrémités de gaines. Ces effets ont été étudiés et les régimes de ventilation adaptés.

Les études ont également démontré que les efforts à exercer par les usagers sur les portes séparant les gaines restent acceptables, et ce, dans le cadre des dispositions de ventilation spécifiques à la situation d'incendie.

2.3 La gaine d'extraction

Dans la configuration initiale, la gaine d'extraction est interrompue au centre du tunnel. Chaque conduit est mis en dépression par des ventilateurs localisés aux têtes française et italienne.

Le Comité de Sécurité recommande de rendre continu le conduit le long du tunnel, afin que les ventilateurs situés à une extrémité constituent un secours des autres. La capacité d'extraction, initialement de l'ordre de 70 m³/s, est portée à 150 m³/s.

L'utilisation des deux installations de ventilation doit permettre a priori d'atteindre cet objectif moyennant une augmentation de capacité des ventilateurs. En fait, des mesures réalisées dans les gaines de ventilation ont démontré qu'il existe des fuites entre la gaine d'extraction et le tunnel d'une part et les gaines d'air frais d'autre part. Les travaux de rénovation doivent permettre de les réduire, mais ils ne peuvent pas les faire disparaître totalement.

Pour tenir compte de cette situation, il a été décidé d'installer quatre ventilateurs dans la gaine d'extraction. Ils permettent de réduire les amplitudes de pression, ce qui réduit les taux de fuites et accroît l'efficacité des ventilateurs centrifuges aux têtes du tunnel.

Des carneaux d'extraction sont aménagés tous les 100 m. Ils sont équipés de trappes motorisées et télécommandables. Ils permettent de focaliser la capacité d'extraction sur la zone de l'incendie.

2.4 Le tunnel

Le tunnel sous le Mont Blanc est soumis à d'importantes différences de pression d'origine naturelle. Des mesures réalisées au début des années 60 avaient démontré qu'elles peuvent atteindre 600 Pa dans un sens ou dans l'autre. Les vitesses induites dans le tunnel peuvent alors atteindre 4 à 5 m/s.

Cet effet de ventilation naturelle s'était manifesté lors de la catastrophe du 24 mars 1999. Il a fortement influencé les avis du Comité de Sécurité.

Comme le contrôle de la vitesse longitudinale revêt un aspect essentiel, le tunnel est donc équipé d'un réseau d'accélérateur. Au total, 76 machines de 600 N de poussée unitaire sont installées sous la voûte du tunnel.

L'activation d'une batterie d'accélérateurs modifie le niveau de pression dans le tunnel. A l'extrémité des gaines d'air frais, la différence de pression peut conduire à inverser le sens de circulation de l'air dans les bouches de soufflage. Si cette zone se trouve affectée par les fumées, ces dernières peuvent se propager très localement dans les gaines d'air frais. Cet effet doit être évité du fait de l'utilisation de ces gaines pour l'alimentation des abris en air frais et du fait de leur utilisation comme galerie d'évacuation. En conséquence, les accélérateurs sont installés hors des zones d'extrémité des gaines d'air frais.

3 LE PRINCIPE DE L'AUTOMATISATION DU SYSTEME DE VENTILATION

3.1 Les recommandations

La recommandation imposée par le Comité de Sécurité constitue la référence essentielle utilisée dans les études de la rénovation.

Les enjeux de sécurité étant très forts, les recommandations de l'AIPCR de 1999 ont également été largement utilisées, notamment dans la conception des automatismes du système de ventilation en cas d'incendie.

Cette référence mentionne les deux phases de contrôle de la ventilation en cas d'incendie :

- La phase d'évacuation : Elle doit permettre aux usagers d'évacuer la zone de l'incendie pour rejoindre les abris dans des conditions de visibilité acceptables. Comme le tunnel sous le Mont Blanc reçoit un trafic bidirectionnel, les usagers peuvent se trouver bloqués de part et d'autre de l'incendie. La recommandation est alors de contrôler la ventilation de sorte que la stratification naturelle des fumées se développe ;
- La phase de lutte contre l'incendie : Elle doit permettre aux pompiers d'intervenir à l'abri de fumées de façon à lutter contre l'incendie. La stratégie consiste alors à repousser les fumées d'un seul côté du foyer pour assurer une atmosphère claire de l'autre côté.

D'un point de vue pratique, pour permettre à la stratification de se développer, il faut maintenir une vitesse longitudinale de l'air aussi faible que possible dans la zone de l'incendie. A l'opposé, pour repousser les fumées, il faut établir une vitesse longitudinale forte, supérieure à un seuil appelé « vitesse critique ». Cette valeur est de l'ordre 2 m/s pour des incendies de faible puissance (quelques MW) à 4 m/s (plusieurs dizaines de MW).

3.2 Les bases scientifiques

L'étude de la vitesse critique a fait l'objet de très nombreux travaux, et même si tous ne fournissent pas des résultats identiques, la formulation proposée par Kennedy synthétise assez bien les différents points de vue (Kennedy, 1996). Les moyens mécaniques permettant d'obtenir ce résultat dans le tunnel sont aujourd'hui correctement évalués à l'aide de simulations éprouvées à l'occasion de nombreux projets.

En revanche, l'étude de la stratification des produits de la combustion dans un tunnel a fait l'objet de très peu d'études.

Le contrôle d'une vitesse longitudinale faible apparaît comme une règle assez simple à appliquer. Elle ne doit pas masquer une réalité scientifique très complexe.

Le principe de contrôle des conditions de la stratification des fumées qui est adopté dans le tunnel sous le Mont Blanc avait fait l'objet d'une présentation en 1999 (Casalé, 1999). Ce principe repose sur les différents résultats de la recherche engagée sur la caractérisation du mouvement de « backlayering ». Il s'agit de la nappe de fumées qui se développe à contresens du mouvement longitudinal général, tant que celui-ci a une vitesse inférieure à la vitesse critique (Figure 1).

Des simulations réalisées sur la maquette adiabatique de l'Université de Valenciennes (France) ont mis en lumière des singularités remarquables dans le profil vertical de vitesses dans la zone du « backlayering » (Mégret & Vauquelin, 2000, Mégret, 1999). Ces singularités, combinées à un important gradient vertical, traduisent une importante stabilité du « backlayering ». Ces caractéristiques ne se manifestent pas dans la nappe stratifiée qui s'évacue en aval de l'incendie. En effet, cette nappe est soumise à des échanges intenses, notamment dans la zone de sillage de l'incendie, du fait de la turbulence qui s'y développe (Figure 1).

Les simulations numériques réalisées à l'Université de Marseille sur la représentation du phénomène de stratification ont démontré que le modèle de turbulence devait comporter des termes complémentaires destinés à tenir compte de la nature des écoulements qui se développent dans le « backlayering » (Cordier, 2001, Auguin et al., 2003). La signification de ces termes conduit à des conclusions identiques à celles qui ont été tirées des essais réalisés à l'aide la maquette de l'Université de Valenciennes.

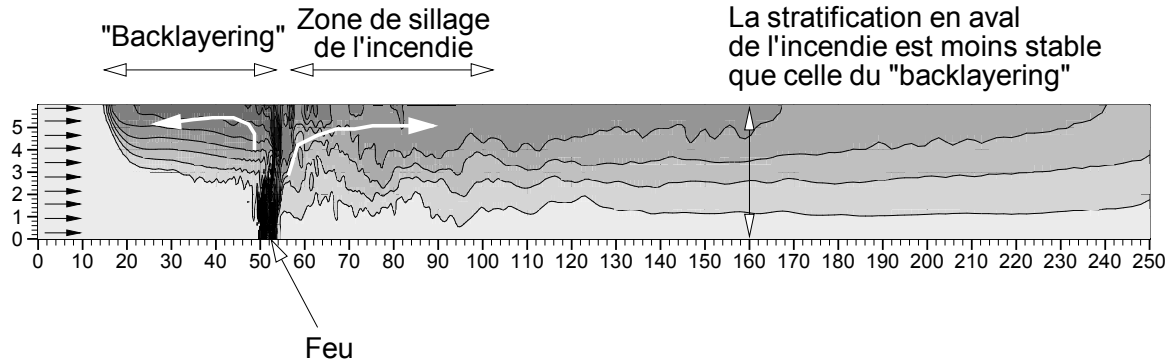


Figure 1 – Simulation numérique d'un feu de 1,5 MW soumis à une ventilation longitudinale de 1 m/s. Champ d'opacité après 6 minutes d'incendie

Comme il n'est pas admissible qu'une nappe stratifiée se propage de façon incontrôlée dans le tunnel, il a fallu rechercher un moyen d'en stopper l'extension longitudinale. Là aussi, le contrôle de la vitesse longitudinale de l'air joue un rôle essentiel. Les premiers résultats des travaux de recherche engagés sur ce thème (vitesse de confinement) font apparaître une relation semblable à celle de la vitesse critique (Casalé et Biollay, 2001).

3.3 L'application au tunnel sous le Mont Blanc

La conclusion pratique des enseignements précédents est que, pour préserver au mieux les conditions de visibilité au cours de la phase d'évacuation, il faut développer une stratification qui dispose des caractéristiques de stabilité du « backlayering ». Comme c'est le sens de la vitesse longitudinale qui détermine cette caractéristique, il faut que la gestion du système de ventilation produise un mouvement de convergence de l'air en direction l'incendie. De cette façon, les nappes stratifiées qui se développent de part et d'autre du foyer ont un mouvement opposé à celui de l'air frais (Casalé, 1999).

Ce mouvement de convergence est produit en activant les ventilateurs d'extraction et en ouvrant les trappes localisées dans la zone de l'incendie. Ce contrôle ne s'accompagne pas nécessairement d'une symétrie du mouvement de convergence. En effet, les scénarios d'incendie sont aléatoires et il n'y a pas de raison pour que la symétrie des pertes de charges soit respectée le long du tunnel.

Cette symétrie de la convergence est en fait assurée mécaniquement par les accélérateurs. Comme la mise en fonctionnement de ces ventilateurs produit localement un niveau de turbulence incompatible avec le maintien de la stratification des fumées chaudes, on définit une zone centrée sur l'incendie appelée zone d'exclusion, à l'intérieur de laquelle les accélérateurs ne sont activés sous aucun prétexte, lors de la phase d'évacuation.

Le fonctionnement des accélérateurs localisés hors de la zone d'exclusion relève d'un processus de régulation destiné à maintenir la symétrie de la convergence de l'air frais en direction de l'incendie. La régulation repose sur des mesures de vitesse longitudinale réalisées avec les 20 anémomètres répartis le long du tunnel. Seule l'information retournée par les capteurs situés hors de la zone d'exclusion est exploitée dans ce processus de régulation. En effet, il est essentiel d'éliminer les valeurs de vitesse qui ne sont pas représentatives du mouvement longitudinal de l'air, notamment parce qu'on suspecte qu'elles sont influencées par les mouvements locaux des fumées.

La régulation est réalisée automatiquement au niveau de la gestion technique centralisée du tunnel. Le rôle de l'opérateur est strictement limité à la confirmation de la localisation de l'incendie et à l'activation de la première phase de contrôle de la ventilation.

4 LES ESSAIS D'INCENDIE

4.1 La conception des essais

La réalisation d'essais d'incendie en vraie grandeur constituait un préalable indispensable à la mise en service de l'ouvrage rénové. Le Comité de Sécurité demandait la réalisation de tests mettant en œuvre des puissances thermiques significatives. La valeur retenue était de 8,4 MW.

Une série d'essais préalables a donc été décidée par les sociétés du tunnel, sur les conseils de SCETAUROUTE. Elle concerne des feux de puissance inférieure, de 1,4 MW. Ces essais préalables visent à préparer les feux de forte puissance et à réaliser les mesures permettant d'identifier les mécanismes d'interaction de l'incendie avec les mouvements résultant du contrôle actif de la ventilation. Cette démarche permet de confirmer les données scientifiques qui sont à l'origine des procédures de contrôle automatique du système de ventilation.

Les essais d'incendie concluent une longue série d'essais unitaires et d'essais d'intégration des systèmes au cours desquels il a été vérifié que les fonctions du système de ventilation sont disponibles.

4.2 Le foyer

Le foyer est localisé à 8 780 m de la tête française, c'est à dire, approximativement au centre du demi-tunnel italien.

Les feux sont réalisés à l'aide de bacs de gazole de diamètre 1,2 m. La puissance unitaire est de 1,4 MW (équivalent à un feu de véhicule léger). Un seul bac est utilisé pour les feux les moins puissants. Six bacs répartis sur une dizaine de mètres sont utilisés dans la seconde série de tests, afin d'assurer un dégagement de 8,4 MW (équivalent à un feu de véhicule utilitaire).



Figure 2 – Image d'un feu de 1,4 MW à l'issue de la phase transitoire. La stratification et l'extension longitudinale des fumées sont contrôlées

4.3 Les moyens de mesure

Les moyens de mesure sont constitués dans tous les tests de 120 capteurs répartis selon un maillage tridimensionnel. Il s'agit essentiellement de thermocouples. Des anémomètres

complètent le dispositif. Ils permettent la détermination des profils de vitesse longitudinale dans l'axe du tunnel.

L'ensemble des capteurs est relié à des centrales d'acquisition. La fréquence de mesure est de l'ordre de 0,3 Hz.

4.4 Les scénarios

Les essais ont été réalisés au mois de janvier 2002 :

- Le 19 janvier : Deux essais avec des feux de 1,4 MW ;
- Le 30 janvier : Deux essais avec des feux de 8,4 MW ;

Les scénarios sont réalisés selon la même séquence. Les tests sont systématiquement doublés, afin de comparer l'efficacité du contrôle automatique avec la réaction d'un opérateur.

Au cours du premier test, le contrôle des procédures de ventilation est réalisé manuellement, par l'ingénieur qui était en charge de l'intégration des automatismes. Le second test est réalisé quelques heures plus tard, selon le même scénario, en activant les procédures automatiques. Les éléments du scénario sont les suivants :

- $t = 0$ mn : Allumage de l'incendie. La vitesse longitudinale est de l'ordre de 4 m/s dans la zone de l'incendie, dans le sens France - Italie (Figure 3) ;
- $t = 1$ mn : Activation de la pré-alerte (désactivation des accélérateurs, mise en fonctionnement des ventilateurs d'extraction, etc.). L'activation de la pré-alerte est effectuée à $t = 0$ mn lors des essais du 19 janvier (1,4 MW) ;
- $t = 2$ mn : Activation de l'alerte (ouverture des trappes dans la zone de l'incendie, contrôle de la vitesse longitudinale à l'aide d'accélérateurs éloignés de l'incendie, etc.).

La durée de l'incendie est de 25 mn. Après l'extinction de ce dernier, le système de ventilation est mis en configuration de purge, afin d'évacuer les fumées résiduelles.

5 ANALYSE DES MESURES

5.1 Les mesures

L'analyse des mesures est réalisée à l'aide d'un logiciel spécifique, développé à SCETAUROUTE depuis plusieurs années à l'occasion de précédents essais d'incendies. Il permet d'établir les évolutions des champs de température et de vitesse à partir des résultats de mesures.

Comme la densité de capteurs est importante, il est aisé de relier l'évolution des champs de température à la vitesse longitudinale contrôlée par le système de ventilation dans la zone de l'incendie. Cette dernière est évaluée à partir des mesures anémométriques réalisées de part et d'autre de la zone du foyer, sur des sections localisées entre les trappes de désenfumage ouvertes (Figure 3). L'analyse des signaux de vitesse débitante calculés à partir des mesures montre que cette vitesse passe dans la plage $- 1$ m/s - $+ 1$ m/s en moins de 4 mn après le déclenchement de la pré-alerte. Cette efficacité est due à la régulation par les accélérateurs.

Dans ce contexte, le comportement du champ de température traduit les mécanismes de stratification des gaz chauds (Figure 4) :

- Dans les premiers instants de l'incendie, les fumées sont transportées par le courant d'air initial, en direction de l'Italie. Les fumées sont destratifiées, alors qu'il existe une stratification thermique en aval de l'incendie (Figure 4, $t = 120$ s) ;
- Deux minutes plus tard, si les fumées restent encore du côté italien de l'incendie alors que la vitesse longitudinale est pratiquement nulle, leur extension a été stoppée et leur régression a démarré sous l'effet de l'extraction (Figure 4, $t = 240$ s) ;
- Près de six minutes après de début de l'essai, les conditions de la stratification sont obtenues. La température augmente sensiblement dans la partie supérieure de la section du tunnel, du fait de la réduction de la vitesse longitudinale. La stratification des fumées se développe progressivement sur la base de cette situation (Figure 4, $t = 360$ s).

Enfin, la comparaison des performances du système automatique avec la réaction d'un opérateur met en lumière la très grande efficacité des algorithmes implémentés dans la gestion technique centralisée. Le contrôle de la vitesse est obtenu en deux fois moins de temps par l'automatisme (Figure 5).

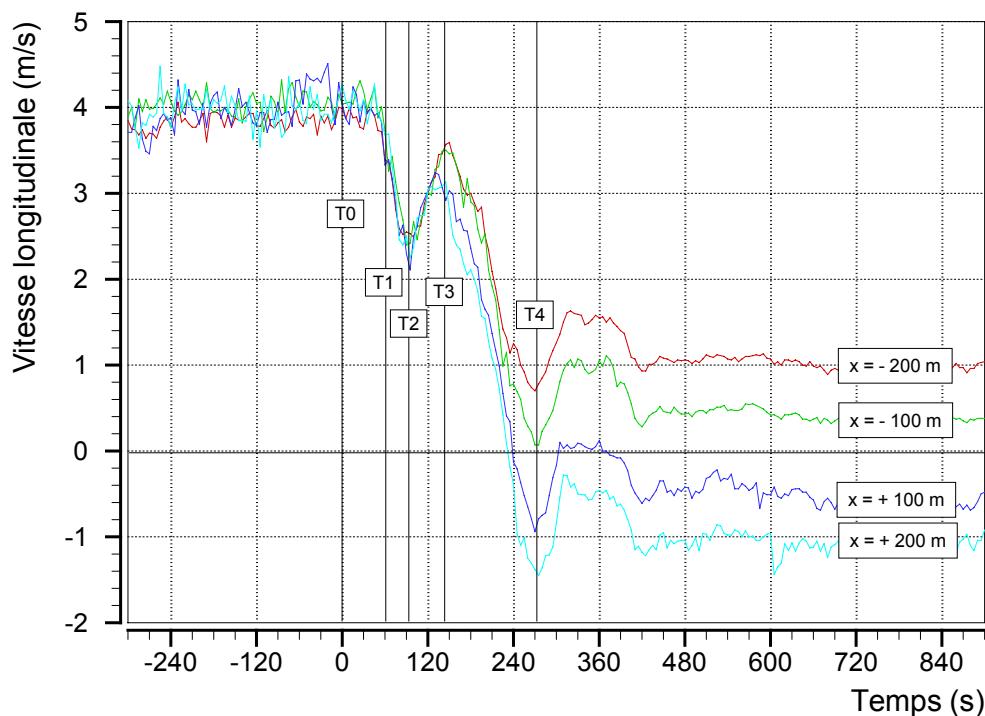


Figure 3 – Evolution des vitesses longitudinales moyennes aux sections localisées de part et d'autre de l'incendie, calculées à partir des mesures anémométriques ponctuelles

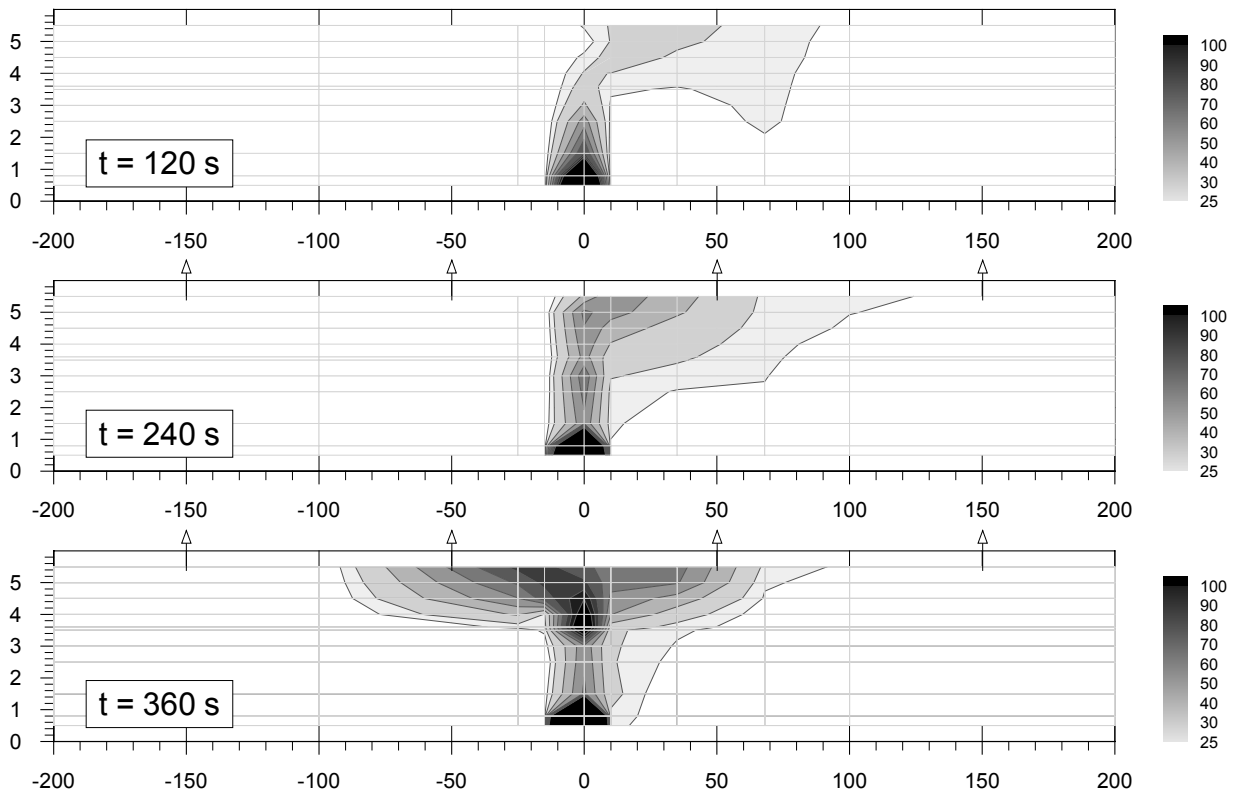


Figure 4 – Champs de température pour le feu de 1,4 MW en ventilation automatique (les températures sont données en °C). Le maillage représente la localisation de certains des capteurs de température

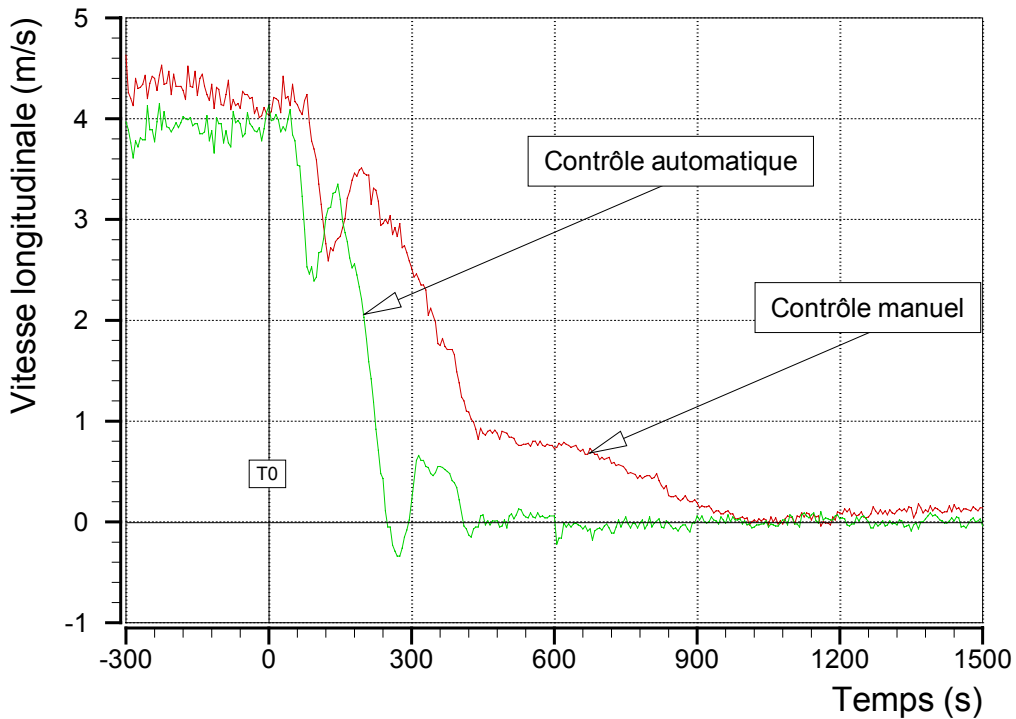


Figure 5 – Comparaison des performances du système automatique avec celles d'un opérateur vis à vis du contrôle de la vitesse longitudinale dans la zone de l'incendie

5.2 Les simulations numériques

Les essais d'incendie ont fait l'objet d'une série de simulations numériques de type CFD. Il s'agit de mieux comprendre les phénomènes qui ont conduit au développement de la stratification des fumées, alors que dans les situations initiales, la totalité de la section du tunnel se trouvait affectée.

La simulation du test de 1,4 MW avec contrôle automatique de la ventilation fournit les champs d'opacité suivants (Figure 6).

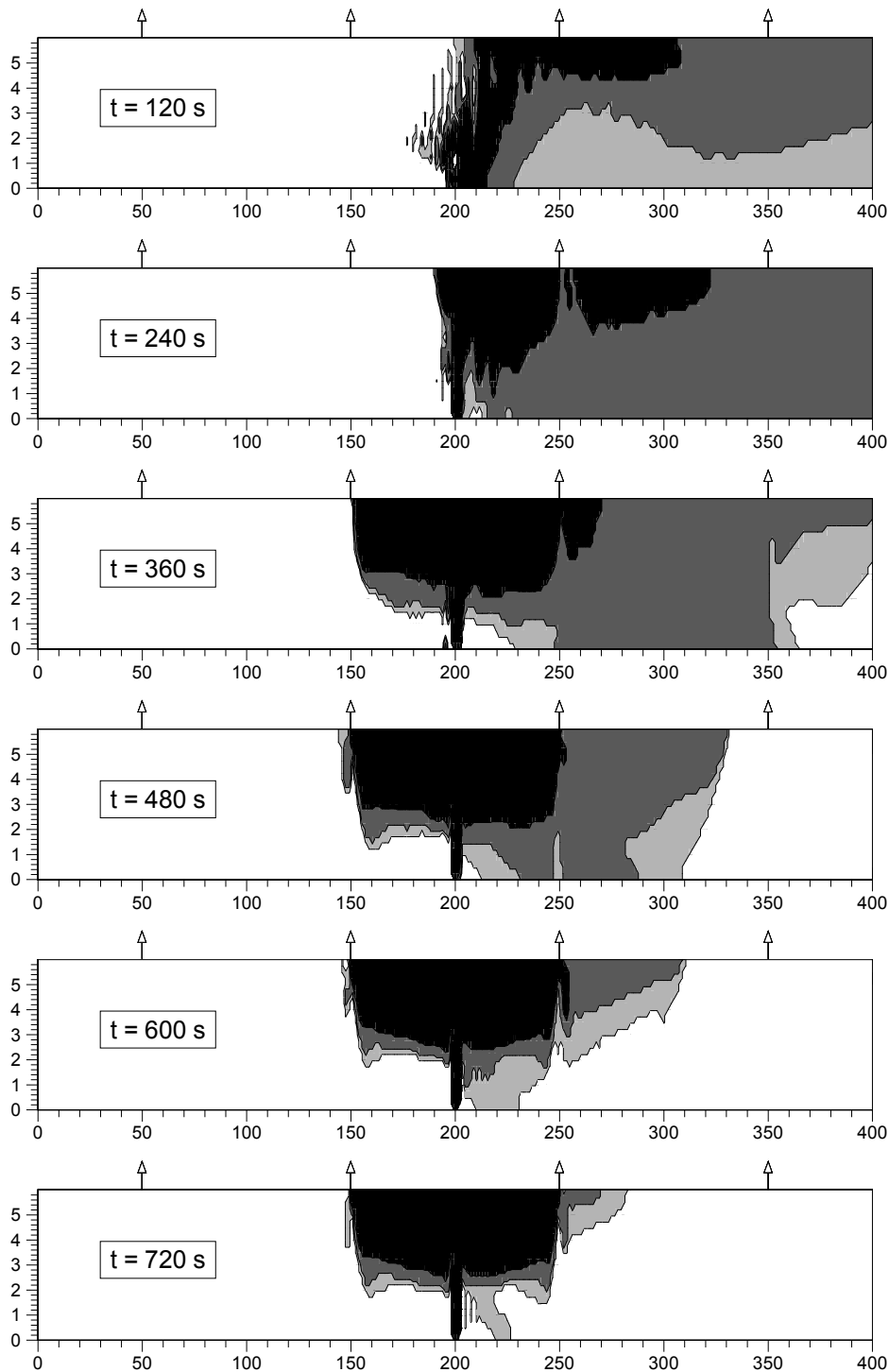


Figure 6 – Calcul de l'évolution des champs d'opacité pour l'essai de 1,4 MW avec contrôle automatique de la ventilation

On montre que les champs de température fournis par le calcul sont cohérents avec ceux qui sont issus de l'analyse des mesures. En d'autres termes, l'opacité apparaît comme étant beaucoup plus envahissante que la température. Elle parcourt des distances éventuellement importantes, alors que la température, qui se trouve soumise aux échanges avec les parois et les couches d'air frais, se trouve confinée près de l'incendie. La stratification thermique, qui est établie vers $t = 360$ s (Figure 4), précède largement la stratification des fumées qui n'est effective que vers $t = 600$ s (Figure 6).

Les calculs montrent également que l'opacité proche du sol, qui tarde à être évacuée au travers des carneaux, correspond en fait aux fumées qui ont été produites au début de l'incendie, qui se sont trouvées destratifiées par l'écoulement initial et qui se trouvent ramenées vers le foyer par l'effet combiné de l'extraction et du contrôle de la vitesse d'air au droit de l'incendie. Ce phénomène, qui démontre la nécessité de procédures de ventilation rapides et efficaces, n'a pas pu être mis en lumière par l'analyse des mesures réalisées lors des essais.

6 ENSEIGNEMENTS ET CONCLUSIONS

L'intégration des automatismes de ventilation dans le système de gestion centralisée du tunnel sous le Mont Blanc est une innovation importante en matière de sécurité. Elle permet de réaliser le pilotage efficace et rapide d'un système de ventilation très complexe. Ce pilotage vise à établir et maintenir des conditions d'évacuation acceptables en contrôlant de façon active les conditions favorables au développement de la stratification naturelle des fumées dans la zone de l'incendie.

Les essais réalisés à la fin des travaux, avant l'ouverture du tunnel au trafic, ont montré que les objectifs visés sont effectivement atteints très rapidement par les procédures automatisées. A titre de comparaison, ils montrent aussi qu'un opérateur entraîné, qui ne commet pas d'erreur dans l'application des procédures de désenfumage, met au moins deux fois plus de temps à obtenir le contrôle de la vitesse longitudinale que le système automatique.

L'intégration des automatismes de ventilation dans le système de gestion centralisée du tunnel sous le Mont Blanc correspond à un coût très marginal des travaux de rénovation. L'essentiel de ces coûts est en fait dû à la mise en conformité de l'ouvrage aux règles exprimées par les textes réglementaires.

L'automatisation du système de ventilation, afin de contrôler des conditions de sécurité lors de l'évacuation des usagers en situation d'incendie, apparaissait comme utopique il y a quelques années. Le succès technique du tunnel sous le Mont Blanc constitue une référence essentielle pour la construction de nouveaux tunnels ou la rénovation d'ouvrages anciens.

BIBLIOGRAPHIE

AIPCR: Maîtrise des incendies et des fumées dans les tunnels routiers, Fire and smoke control in road tunnels, Publication inter-congrès du Groupe de travail N°6, Comité des Tunnels Routiers de l'Association Mondiale de la Route (AIPCR), 1999

Auguin G., Forestier B., Giovannelli G., Casalé E.: Simulation numérique du transport de fumées stratifiées en tunnel routier avec un modèle $k-\varepsilon$ corrigé au second ordre et comparaison expérimentale, XVIème Congrès Français de Mécanique, Nice, 1-5 Septembre 2003

Casalé E. : Les incendies en tunnel : de la pratique à la définition des besoins, AFTES, Journées Internationales de Paris, 25-28 Octobre 1999

- Casalé E., Biollay H.: A fully controlled ventilation response in the case of a tunnel fire – The « confinement » velocity, 4th International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels, Madrid (Spain), 2 – 6 April, 2001
- Casalé E., Houseaux B., Weatherill A., Guigas X., Marlier E., Brousse B. : Full scale fire tests performed in the Mont Blanc tunnel - Evaluation of the efficiency of the fully automatic ventilation responses, Int. Conf. Fires in Tunnels, Basel (Switzerland), December 2002
- Cordier H.: Modélisation numérique des incendies en tunnel, Thèse de l'Université de la Méditerranée, 2001
- Guigas X., Weatherill A., Trottet Y., Casalé E. : The new ventilation system of the Mont Blanc tunnel, 4th International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels, Madrid (Spain), 2 – 6 April, 2001
- Kennedy W.D. Critical velocity: Past, present and future, One Day Seminar on Smoke and Critical Velocity in Tunnels, Heathrow (London, UK), 2nd April 1996
- Mégret O.: Etude expérimentale et théorique des mouvements de fumées induits dans un tunnel par un incendie, Thèse de l'Université de Valenciennes, 1999
- Mégret O., Vauquelin O. : A model to evaluate tunnel fire characteristics, *Fire Safety Journal*, 34(4), p.393-401 (2000)