

Bureau d'Enquêtes sur les Accidents de Transports Terrestres

**Reconstitution numérique de l'incendie du 4 juin 2005
dans le tunnel routier du Fréjus et étude de scénarios alternatifs**

Rapport final

**Fascicule 0
Synthèse générale de l'étude**

Septembre 2007



Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

ministère de l'Écologie
du Développement
et de l'Aménagement durables

Sommaire

Objectifs de l'étude et méthodologie générale.....	4
Phase 1 : Préparation et calage du modèle.....	5
Phase 2 : Reconstitution de l'incendie.....	6
Phase 3 : Étude de scénarios alternatifs de désenfumage.....	7
Phase 4 : Influence du lieu de l'incendie et des conditions atmosphériques extérieures.....	8
Influence de la position de l'incendie.....	9
Étude monodimensionnelle de la propagation des fronts en fonction des différences de pression et de la position de l'incendie.....	10
Conclusion générale de l'étude.....	10

Objectifs de l'étude et méthodologie générale

L'étude présentée dans le présent rapport a été réalisée par le Centre d'Études des Tunnels à la demande du Bureau d'Enquêtes sur les Accidents de Transports Terrestres, dans le cadre de son enquête administrative sur l'incendie d'un poids lourd survenu le 4 juin 2005 dans le tunnel routier du Fréjus. Cet accident a fait deux victimes décédées.

L'étude vise à préciser l'enquête technique du BEA-TT et à aider celui-ci à formuler ses recommandations sur les points relatifs au désenfumage du tunnel. On peut résumer ses objectifs comme suit :

- Simuler numériquement l'évolution de l'enfumage de l'ouvrage au début de l'incendie, afin notamment de valider la méthode de calcul et d'estimer l'ordre de grandeur de la puissance thermique qui conduit aux conditions rencontrées le 4 juin 2005.
- Estimer comment ces conditions auraient été modifiées, d'une part si la localisation de l'incendie avait pu être plus précise, et d'autre part si en outre le délai de mise en marche du désenfumage avait pu être réduit ; ces scénarios supposent des équipements qui n'étaient pas encore en fonction au moment de l'incendie mais le sont aujourd'hui.
- Enfin, obtenir une vision du comportement probable des fumées si un incendie similaire survenait à un endroit différent dans l'ouvrage et/ou avec des conditions atmosphériques externes différentes, dans les conditions actuelles d'équipement du tunnel. Un certain nombre de cas ont été sélectionnés.

L'étude a été menée à l'aide d'un logiciel industriel de mécanique des fluides numérique, technologie souvent désignée par *Computational Fluid Dynamics* ou CFD. Ce type de logiciel résout de façon approchée les équations fondamentales de la mécanique des fluides, éventuellement couplées à d'autres modèles physiques (réactions chimiques, transfert de masse entre phases, etc.), sur un maillage tridimensionnel (dit « 3D ») du domaine spatial étudié. Ce type de modélisation suppose de faire un certain nombre de choix entre plusieurs modèles possibles pour un même phénomène. Ces choix doivent résulter d'un compromis entre la précision recherchée, l'adaptation du modèle au problème physique étudié et le coût du calcul. Les calculs CFD transitoires (c'est à dire ceux qui simulent l'évolution des conditions dans le temps) peuvent en effet être extrêmement longs (de l'ordre de plusieurs semaines de calcul). Le fascicule 1 du rapport expose les choix de modélisation effectués.

Il faut être bien conscient des limitations de ces simulations. La nature des équations interdit toute résolution exacte et leur difficulté impose des méthodes numériques complexes qui donnent une approximation de la solution et doivent entre autres tenir compte de phénomènes à caractère aléatoire comme la turbulence. Certains aspects ne sont pas modélisés ou ne le sont que de façon très schématique. Par ailleurs, les données et les paramètres physiques sont eux-mêmes soumis à des incertitudes. Il ne faut donc pas considérer les résultats comme des chiffres certains, mais plutôt s'attacher aux tendances que les simulations permettent de mettre en évidence.

L'étude s'est déroulée en quatre phases dont les résultats sont résumés dans les paragraphes suivants.

Phase 1 : Préparation et calage du modèle

Un nombre important de calculs préliminaires destinés à optimiser le calcul 3D ont été réalisés. Ils ont permis de mettre au point le maillage 3D ainsi que différents choix de modélisation.

Le maillage représente un tronçon de tunnel d'une longueur approximative de 1300 m, soit un peu plus que la longueur de la zone d'extraction. Les conditions aux limites du domaine ont cependant été soigneusement ajustées pour tenir compte au mieux de l'écoulement dans le reste de l'ouvrage. On a pour cela utilisé des simulations monodimensionnelles (1D). Ce type de modélisation suppose que les variables physiques sont uniformes dans une section transversale donnée du tunnel. On ne reproduit donc pas les phénomènes de stratification des fumées, et la propagation du front est mal décrite. Cela interdit l'utilisation de tels modèles pour l'étude complète. En revanche, les calculs 1D sont très rapides et bien adaptés pour évaluer les conditions générales d'écoulement dans un ouvrage long comme le tunnel du Fréjus. Des simulations 1D ont donc été effectuées et comparées aux mesures anémométriques du 4 juin 2005 ; leurs résultats ont ensuite servi à caler les paramètres du modèle 3D.

La gaine de désenfumage est modélisée afin que la répartition des débits d'extraction entre les trappes de désenfumage soit réaliste.

Le modèle 3D prend en compte les effets dits de flottabilité (variation de la masse volumique de l'air en fonction de la température), la turbulence, le transfert de chaleur à travers les parois du tunnel. Le transfert de chaleur est modélisé explicitement dans la dalle de faux plafond car c'est à cet endroit que se produisent les transferts les plus importants.

Le foyer est modélisé par une simple source de chaleur ; la réaction de combustion n'est pas simulée. Le calcul est ainsi beaucoup plus rapide et stable ; il donne des résultats physiquement acceptables dans la zone du foyer et réalistes lorsqu'on s'en éloigne. Pour des foyers aussi complexes et faisant intervenir des combustibles solides, les modèles de combustion « simples », c'est-à-dire nécessitant des temps de calcul raisonnables, ne donnent pas forcément de meilleurs résultats.

La durée d'incendie simulée est de 24 minutes pour tous les calculs 3D. Le calcul s'arrête au moment où les premières modifications ont été apportées à la stratégie de désenfumage. Tenir compte de ces modifications aurait obligé à rallonger significativement le domaine de calcul ; en outre, on considère généralement que la sécurité des personnes est conditionnée par le déroulement des premières minutes de l'incendie. Enfin, les moyens dont dispose le Cetu ne permettent pas de simuler des durées plus longues en un temps de calcul raisonnable : une simulation de 24 minutes d'incendie avec les modélisations retenues nécessite deux à trois semaines de calcul.

Phase 2 : Reconstitution de l'incendie

Après la phase de préparation et de calage du modèle, les premières simulations ont visé à retrouver par le calcul les conditions physiques rencontrées dans le tunnel au début de l'incendie du 4 juin 2005.

Les principaux éléments factuels de l'incendie qui ont servi à élaborer les simulations sont les suivants :

- Le poids lourd en feu, dit PL A, circulant dans le sens France-Italie, s'arrête à 5938 m de la tête française, c'est-à-dire près du milieu de l'ouvrage ; la puissance du feu commence à croître significativement à ce moment.
- À cet instant, la ventilation sanitaire est en fonction avec un soufflage d'air frais dans tout le tunnel. Les conditions extérieures et la position centrale de l'incendie font que le courant d'air à cet endroit est faible, de l'ordre de 1 m/s dans le sens France-Italie.
- Après quelques modifications de ventilation n'ayant pas entraîné de changement significatif des conditions aérauliques dans le tunnel, le désenfumage est lancé 8 minutes et 46 secondes après l'arrêt du PL A. 10 trappes de désenfumage sont ouvertes : une du côté France par rapport au PL A, 9 du côté Italie, alors que le désenfumage s'effectue théoriquement de manière symétrique par rapport au feu.
- Les véhicules légers présents dans le tunnel traversent la fumée ou font demi-tour et sortent de l'ouvrage. Trois poids lourds (PL B, PL C, PL D) sont arrêtés par la fumée dans le sens Italie-France. Les chauffeurs des PL A, B et D sont évacués à bord de véhicules légers. Les deux chauffeurs du PL C, qui n'ont pas quitté immédiatement leur véhicule, sont piégés par la fumée et trouveront la mort. Ils seront tous les deux retrouvés au voisinage de l'abri 6, qui se trouve à un peu plus de 500 m du PL A du côté italien.

La figure ci-dessous résume la disposition des véhicules dans le tunnel ainsi que la position des trappes de désenfumage et de l'abri 6.

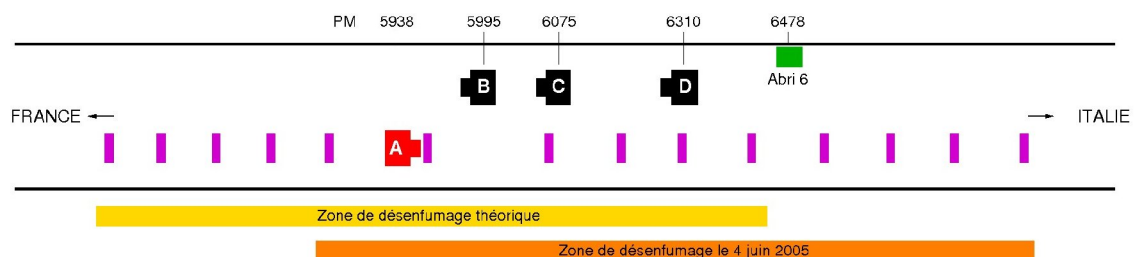


Figure 1: Position des véhicules et des issues dans le tunnel.

Trois hypothèses ont été considérées pour la puissance maximale du feu : 30, 60 et 90 MW. Pour chaque hypothèse, on a supposé une montée en puissance progressive en 7 à 11 minutes.

Les trois simulations réalisées permettent de retrouver l'évolution observée du courant d'air au droit de l'incendie, où la vitesse est initialement de moins de 1 m/s en direction de l'Italie puis, une fois le désenfumage en fonction, atteint environ 3,5 m/s dans cette même direction.

En termes de déplacement des fronts de fumée, les trois hypothèses donnent des résultats assez conformes aux observations effectuées. Il n'est pas possible d'écarter l'une ou l'autre des hypothèses sur ce seul critère.

L'hypothèse de puissance 30 MW apparaît en revanche trop faible lorsqu'on s'intéresse aux températures atteintes dans le tunnel. On remarque notamment que la température au voisinage du PL B aurait été trop basse pour que ce véhicule s'enflamme comme cela a été le cas.

À l'inverse, une puissance de 90 MW semble surestimée. Le calcul prévoit pour cette puissance des températures d'air supérieures à 100°C sur une grande partie de la zone enfumée, ce qui impliquerait que les deux victimes, qui ont séjourné assez longtemps dans ces conditions, aient subi des brûlures dont il n'est aucunement fait mention par ailleurs.

Une puissance de 60 MW semble donc être l'hypothèse la plus proche de la réalité du sinistre, bien qu'un peu faible, là encore au vu des températures atteintes au voisinage du PL B. Cette valeur a été retenue pour la suite de l'étude afin de faciliter la comparaison des résultats.

Avec cette puissance d'incendie, les températures calculées au voisinage des différents équipements du tunnel : câble radio, éclairage, plots de jalonnement, etc. permettent d'expliquer les défaillances constatées. Les températures calculées dans les structures de génie civil sont également cohérentes avec les dégradations qu'elles ont subies.

En termes de toxicité, le calcul avec une puissance de 60 MW donne des valeurs de l'ordre de 1000 ppm pour la concentration en CO à laquelle les victimes ont été exposées. On estime qu'un sujet moyen peut résister à de telles concentrations pendant environ 30 minutes. Passé ce délai, le sujet peut être toujours vivant mais dans l'incapacité de se soustraire au danger par ses propres moyens. L'impact sanitaire des fumées ne se résume cependant pas au seul CO ; les victimes ont également inhalé une grande quantité de suies qui ont obstrué leurs voies respiratoires. Les effets de ces suies sont assez mal connus et il n'est pas possible de les quantifier.

Enfin, la visibilité calculée était, dans tous les cas considérés, nulle partout où de la fumée était présente (la progression n'était possible qu'à tâtons), et ceci dès les premières minutes du sinistre.

Phase 3 : Étude de scénarios alternatifs de désenfumage

Deux scénarios de désenfumage alternatifs ont fait l'objet de simulations 3D afin d'évaluer l'apport des équipements mis en fonction dans le tunnel postérieurement à l'incendie.

Les conditions de l'incendie étaient celles du 4 juin 2005 (pressions atmosphériques, emplacement du foyer). L'hypothèse de puissance maximale de 60 MW a été utilisée. Pour ces deux scénarios, le désenfumage a été effectué à l'aide de 5 trappes de chaque côté de

L'incendie, contrairement à ce qui s'est passé le 4 juin 2005 (extraction avec une trappe côté France et 9 côté Italie). La seule différence entre les deux scénarios alternatifs était le délai de mise en fonction du désenfumage : 8 min 45 s (identique à ce qui s'est passé le 4 juin 2005) pour le scénario A, 2 min pour le scénario B. Ce dernier scénario peut être considéré comme une représentation de ce qui aurait pu se passer si le tunnel avait été équipé d'une détection automatique d'incident en fonctionnement à la date du sinistre.

Les résultats du scénario A (désenfumage centré sur l'incendie mis en marche au bout de 8 min 45) ont montré que le front de fumée aurait eu le temps de se propager vers l'Italie bien au-delà de l'abri 6 avant que le désenfumage ne soit actif à plein régime. Une fois le désenfumage activé, le front de fumée est progressivement ramené vers la zone d'extraction. Cependant, on estime qu'il faut attendre environ 30 minutes pour que l'abri 6 soit de nouveau libre de fumée. La longueur du domaine modélisé dans le calcul ne permet pas d'être plus précis. En régime établi, c'est-à-dire une fois les conditions stabilisées dans le tunnel, le front de fumée côté Italie reste à l'intérieur de la zone d'extraction et l'abri 6 est donc hors de la zone enfumée. Les conditions subies par les deux chauffeurs du PL C auraient donc été très mauvaises (visibilité nulle, atmosphère toxique) pendant une vingtaine de minutes. Leur survie n'était donc pas garantie.

Le scénario B (désenfumage en 2 minutes) donne des résultats plus satisfaisants en termes de sécurité. La progression du front de fumée en direction de l'Italie est fortement ralentie dès que le désenfumage atteint un niveau suffisant. Le front de fumée stagne pendant plusieurs minutes au voisinage du PL D avant de reprendre sa progression vers l'Italie. Il ne dépasse ensuite pas la limite de la zone d'extraction, et l'abri 6 ne se trouve donc jamais dans la zone enfumée. Cela crée des conditions beaucoup moins défavorables à l'auto-évacuation des chauffeurs du PL C : pendant plus de 10 minutes, ils auraient ainsi eu moins de 250 m à parcourir pour sortir de la zone enfumée. Ils seraient donc probablement sortis de la fumée en effectuant le même parcours que dans l'incendie réel. Cela ne permet cependant pas de conclure avec certitude sur leurs chances de survie, l'atmosphère demeurant très nocive dans la zone enfumée.

Du côté français, on observe pour les deux scénarios la remontée d'une nappe de fumée sur environ 150 m. Cette remontée de fumée aurait pu gêner l'intervention des secours, mais la longueur de la nappe reste modeste.

Un troisième scénario alternatif de désenfumage avait été envisagé afin d'examiner en outre l'effet du système de contrôle automatique du désenfumage mis en fonction après l'incendie du 4 juin 2005. Ce scénario n'a toutefois pas fait l'objet d'une simulation 3D car les résultats auraient été proches de ceux du scénario B où le courant d'air est de fait bien contrôlé au droit de l'incendie.

Phase 4 : Influence du lieu de l'incendie et des conditions atmosphériques extérieures

Les différences entre l'incendie tel que reconstitué dans la phase 2 et les scénarios alternatifs étudiés dans la phase 3 portaient uniquement sur la commande de la ventilation du tunnel. Les autres paramètres n'ont pas été modifiés, notamment la différence de

pression atmosphérique entre les têtes et la position de l'incendie dans le tunnel. Or ces paramètres sont importants car ils déterminent les conditions aérauliques dans le tunnel, aussi bien au début de l'incendie qu'une fois le désenfumage mis en fonction. Il a donc été décidé de réaliser un calcul dans lequel le courant d'air initial serait plus fort ; dans les conditions météorologiques du 4 juin 2005, on aurait pu obtenir ces conditions si l'incendie s'était déclaré plus près d'une tête.

Le nombre de combinaisons de paramètres étant très grand, on a également cherché à mettre au point une méthode plus rapide pour estimer les déplacements des fronts de fumée.

Influence de la position de l'incendie

Un calcul 3D a été réalisé en supposant que l'incendie se trouvait à 1700 m environ de la tête française (au lieu du PM 5938 qui est presque au milieu de l'ouvrage). La différence de pression atmosphérique entre les têtes a été prise égale à celle du 4 juin 2005, soit 100 Pa. La DAI et le système de contrôle du courant d'air ont été supposés installés et en fonctionnement comme c'est actuellement le cas (on rappelle que ces deux équipements n'étaient pas encore en fonction à la date de l'incendie). Le désenfumage a été supposé centré sur l'incendie et lancé en 2 minutes. La principale différence par rapport au scénario alternatif B est que le courant d'air initial était nettement supérieur, de l'ordre de 4 m/s dans le sens Italie-France. L'intérêt de ce calcul est d'évaluer la durée de la phase transitoire du désenfumage ainsi que les conditions au début de l'incendie dans un cas où le désenfumage est théoriquement performant mais où les conditions initiales ne sont pas très favorables.

Ce courant d'air fort entraîne rapidement les fumées en direction de la tête française dans les premières minutes de l'incendie. La position du front se stabilise après 6 à 7 minutes d'incendie. Dans le même temps, une nappe de fumée se développe du côté italien. La longueur enfumée maximale est atteinte après 8 minutes d'incendie ; elle est de 1450 m environ. Le front de fumée côté France revient alors lentement vers le foyer et la zone enfumée se stabilise après une vingtaine de minutes sur une longueur légèrement inférieure à 600 m.

En régime établi, les fumées sont bien maîtrisées mais la phase transitoire peut s'avérer problématique. Par exemple, un usager qui se trouverait à 400 m du foyer côté France verrait le front de fumée arriver sur lui moins de deux minutes après le début de l'incendie, à une vitesse d'environ 5 m/s (18 km/h). Il resterait dans la fumée pendant environ 10 minutes. Si l'usager se trouve plus près du feu, le front arrive plus vite sur lui et la durée d'exposition à la fumée est considérablement allongée. Les gaz toxiques auxquels seraient exposés ces usagers sont assez fortement dilués par le courant d'air ; les effets irritants des suies peuvent cependant être gênants.

La longueur de l'ouvrage, et donc les forts courants d'air générés par la ventilation sanitaire, peuvent donc rendre problématiques les premières minutes d'un incendie même si le contrôle des fumées est bon une fois les conditions stabilisées.

Étude monodimensionnelle de la propagation des fronts en fonction des différences de pression et de la position de l'incendie

Une multitude d'autres scénarios peuvent être envisagés en fonction de différents paramètres, notamment la différence de pression entre les têtes du tunnel et la position de l'incendie. Les étudier de manière exhaustive au moyen de simulations 3D serait extrêmement lourd.

Il a donc été décidé de se concentrer sur le déplacement des fronts de fumée, qui est la principale variable influençant la sécurité des usagers, du moins dans un tel cas d'incendie de forte puissance produisant beaucoup de suies, où la visibilité est systématiquement nulle et la toxicité assez élevée dans la zone enfumée. Le déplacement des fronts de fumée peut être estimé à partir de simulations monodimensionnelles isothermes transitoires et d'une analyse experte des résultats à la lumière des résultats 3D déjà obtenus. On a en effet déjà récolté un certain nombre d'informations sur le comportement des fronts en présence d'un courant d'air plus ou moins bien contrôlé ainsi que sur les phases transitoires. Cette démarche permet d'estimer la longueur maximale de tunnel enfumée et la durée nécessaire pour atteindre le régime établi.

Quatre scénarios ont ainsi été traités, correspondant à des différences de pression entre les têtes au-delà desquelles des mesures spécifiques d'exploitation sont prévues et à des positions de l'incendie dans le tunnel ne permettant qu'un contrôle assez approximatif du courant d'air. On atteint rarement, dans de tels cas, l'objectif de cantonnement des fumées. Le tunnel peut être totalement enfumé ; les phases transitoires peuvent également être très longues.

Conclusion générale de l'étude

Le désenfumage du tunnel du Fréjus lors de l'incendie du 4 juin 2005 n'a pas, pour différentes raisons, pu être effectué de façon optimale.

La reconstitution de l'incendie a permis de préciser les conditions rencontrées par les usagers et les secours pendant l'événement. L'étude de scénarios alternatifs de désenfumage du même incendie a permis d'examiner l'impact des nouveaux équipements mis en fonction dans le tunnel après l'incendie et destinés à centrer l'extraction sur le foyer et à la déclencher plus rapidement. On peut retenir les points suivants :

- Quel que soit le cas de figure, en raison de la forte puissance et du caractère très fumigène du foyer, les fumées ne sont pas stratifiées de telle sorte que, dans toute zone où de la fumée est présente, la visibilité est pratiquement nulle, ce qui rend très difficile l'auto-évacuation des usagers et l'intervention des secours.
- Un désenfumage centré sur l'incendie permet d'éviter l'enfumage d'une grande partie du tunnel. Une fois les conditions stabilisées, la zone enfumée a une longueur d'environ 600 à 650 m.
- Le délai de mise en marche du désenfumage a une influence très importante sur les conditions rencontrées par les usagers pris dans la fumée : si le désenfumage est mis

en marche très rapidement, la distance à parcourir pour sortir de la fumée est nettement moins longue. Le front de fumée n'atteint en outre jamais l'abri 6.

- Dans tous les cas de figure, l'atmosphère dans la zone enfumée est très nocive et il n'est pas certain que la vie des deux chauffeurs aurait été sauvée par un désenfumage « optimisé » le 4 juin 2005.

Ces résultats confirment l'intérêt des équipements aujourd'hui en place (détection automatique d'incident et contrôle du courant d'air) pour des situations d'incendie comparables à celle du 4 juin 2005.

L'étude a par ailleurs examiné comment le même incendie pourrait se dérouler s'il se produisait en divers endroits du tunnel avec diverses conditions atmosphériques extérieures, notamment dans des cas plus défavorables, en tenant compte des équipements aujourd'hui en place. Les principales conclusions sont les suivantes :

- Si le courant d'air au moment du déclenchement de l'incendie est élevé, du fait que celui-ci se déroule plus près d'une tête, ou que les conditions météorologiques sont défavorables, on trouve des résultats bien différents, avec notamment une longueur de tunnel enfumée beaucoup plus importante pendant la phase transitoire. La nocivité des fumées à grande distance du foyer est toutefois nettement moindre que dans un cas comme celui du 4 juin 2005.
- La performance du contrôle du courant d'air longitudinal en fonction des différences de pression atmosphériques et de la position de l'incendie dans le tunnel conditionne la longueur enfumée en régime établi mais aussi la durée de la phase transitoire, qui peut dépasser les trente minutes. Le courant d'air initial conditionne essentiellement la longueur maximale de tunnel enfumée.