

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 4
Illustration de l'influence du lieu de l'incendie et des conditions atmosphériques**

Septembre 2007



Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

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

Sommaire

1 Objectifs et démarche de la phase 4.....	4
1.1 Objectifs de la phase 4.....	4
1.2 Scénario étudié par simulation 3D.....	4
1.3 Analyse monodimensionnelle et expertise des résultats pour différentes situations...5	
2 Résultats de l'étude tridimensionnelle.....	6
2.1 Phase initiale sans désenfumage (de 17:48:25 à 17:50:25).....	6
2.2 Phase de désenfumage (à partir de 17:50:25).....	6
2.3 Résultats détaillés.....	11
2.4 Conclusions de l'étude tridimensionnelle et discussion du scénario.....	13
3 Analyse monodimensionnelle et expertise des résultats pour différentes situations.....	14
3.1 Pertinence et faisabilité d'une analyse monodimensionnelle « experte ».....	14
3.2 Analyse du cas précédent.....	15
3.3 Étude de quelques situations non simulées en 3D.....	16
4 Conclusions de la phase 4.....	23

1 Objectifs et démarche de la phase 4

1.1 Objectifs de la phase 4

Après avoir effectué la reconstitution de l'incendie et étudié l'influence de la mise en œuvre du désenfumage en termes de précision et de délai, nous nous attachons maintenant à examiner l'influence de la position de l'incendie dans l'ouvrage et de la différence de pression atmosphérique entre les têtes. En effet, le 4 juin 2005, la différence de pression était faible (100 Pa) et la ventilation sanitaire était en fonction au moment de l'incendie avec un soufflage d'air frais sur toute la longueur du tunnel. La vitesse du courant d'air était donc fortement variable, avec des valeurs pouvant dépasser 5 voire 6 m/s à proximité des têtes. Le PL A se trouvait dans la zone la plus favorable de ce point de vue, avec un courant d'air dû à la ventilation sanitaire très faible.

Il est donc apparu intéressant de se faire une idée des difficultés supplémentaires qu'aurait entraînées une localisation de l'incendie plus proche d'une tête et/ou des conditions atmosphériques plus pénalisantes. Les simulations précédentes montrent que la stratification n'est *a priori* pas suffisante pour assurer une visibilité correcte dans toute zone où des fumées sont présentes, compte tenu de l'importance du foyer et de sa production de suies. Par conséquent les mouvements des fronts de fumée seront un élément essentiel pour juger du niveau de dangerosité du scénario. La simulation doit en particulier s'attacher à évaluer le temps nécessaire pour ramener les fronts de fumée à l'intérieur de la zone d'extraction.

Réaliser des simulations 3D pour chaque situation envisageable se heurterait rapidement au nombre de combinaisons de paramètres possibles et au volume de calculs correspondant. C'est pourquoi il a été développé une autre approche qui s'appuie sur une analyse « experte » de calculs monodimensionnels.

1.2 Scénario étudié par simulation 3D

Le scénario choisi est celui d'un incendie au PM 1700 environ, dans les conditions atmosphériques du 4 juin 2005 (surpression côté France de 100 Pa). Le tunnel est supposé doté des systèmes de détection automatique d'incident et de contrôle du courant d'air longitudinal mis en place après l'incendie du 4 juin 2005. Le courant d'air initial est approximativement de 4 m/s et le système de ventilation permet de le ramener à une valeur très faible en régime établi.

Les véhicules présents dans le tunnel sont supposés être les mêmes que pour les simulations précédentes, même si le déroulement de l'événement aurait certainement été différent en raison du fort courant d'air en direction de la France à l'emplacement du foyer. Cette simplification permet une comparaison plus facile des différents résultats.

Les hypothèses principales sont les mêmes que précédemment en ce qui concerne la puissance du foyer et son évolution (60 MW, soit la puissance estimée de l'incendie réel ; cette puissance est cependant le double de celle de l'incendie de dimensionnement réglementaire), le délai de mise en route du désenfumage (2 minutes) et les divers aspects

de la modélisation. Le maillage a cependant été allongé afin de modéliser l'ouvrage jusqu'à la tête française et d'éviter que le front de fumée sorte du domaine de calcul ; ceci permet d'obtenir une position du front de fumée ayant un sens physique dans tous les cas, à la différence du premier scénario alternatif de la phase 3 (scénario A). Le maillage comprend ainsi près de 1 520 000 éléments. Les résultats figurent au chapitre 2 ci-après.

1.3 Analyse monodimensionnelle et expertise des résultats pour différentes situations

Pour aller plus loin, il a été mis au point une approche « experte » de calculs monodimensionnels, rendant inutiles de nouvelles simulations 3D.

Le comportement des fronts de fumée de part et d'autre d'un incendie est régi par un petit nombre de paramètres : la puissance de l'incendie, la géométrie du tunnel (section, pente), la vitesse du courant d'air et, dans une moindre mesure, l'encombrement du tunnel, par des véhicules par exemple. Nous considérons ici un foyer de caractéristiques fixées et un même tunnel occupé par le même nombre de véhicules ; le mouvement des fronts de fumée est donc uniquement fonction de la vitesse du courant d'air et de son évolution temporelle, indépendamment de l'origine de ce courant d'air (différences naturelles de pression ou ventilation mécanique).

La commande du désenfumage du tunnel du Fréjus se fait par des scénarios préprogrammés qui sont automatiquement sélectionnés en fonction de la différence de pression mesurée entre les têtes et de la position de l'incendie renseignée par le régulateur. Il est donc très facile, pour tout jeu de paramètres, de reconstituer le profil de vitesse d'air dans le tunnel par une simulation monodimensionnelle. Le temps de mise en régime du désenfumage est sensiblement le même dans tous les cas de figure, de l'ordre de 3 minutes. Par ailleurs, les simulations 3D effectuées nous fournissent les données quantitatives nécessaires pour prévoir le mouvement des fronts de fumée à partir du profil de vitesse avec une précision suffisante dans tous les cas. L'étude de différents scénarios types peut donc être effectuée par une méthode « experte » plutôt que par une simulation 3D complète de chaque scénario, ce qui demanderait des ressources considérables.

On pourra ainsi obtenir un ordre de grandeur de la longueur maximale de tunnel enfumée ainsi que de la longueur enfumée en régime permanent pour chaque situation. Pour le foyer considéré, l'hypothèse « pessimiste » de destratification complète, inhérente aux calculs monodimensionnels, est représentative de la réalité. On pourra donc obtenir une bonne évaluation du niveau de sécurité.

Le chapitre 3 ci-après compare la méthodologie employée avec le cas simulé en 3D puis expose les résultats obtenus sur quatre autres cas.

2 Résultats de l'étude tridimensionnelle

2.1 Phase initiale sans désenfumage (de 17:48:25 à 17:50:25)

2.1.1 Mouvement du front de fumée

Le courant d'air longitudinal est dirigé vers la France et sa vitesse est de 4 m/s. Les fumées sont donc balayées vers la tête française et la vitesse du front est assez proche de celle du courant d'air. Au bout de deux minutes, le front de fumée atteint le PM 1140 environ ; la longueur enfumée est donc de près de 600 m.

2.1.2 Températures

Du fait de la puissance encore faible de l'incendie et du fort courant d'air, les températures restent basses pendant cette phase. Hors du foyer lui-même, on ne relève pratiquement aucune température supérieure à 100°C. Les températures à hauteur d'homme ne dépassent 60°C que sur un très court tronçon de tunnel, les valeurs les plus couramment rencontrées étant plutôt de 30 à 40°C.

2.1.3 Visibilité

Au bout de deux minutes, les fumées peu denses produites par le début d'incendie suffisent déjà à réduire la visibilité à moins de 20 m dans la majeure partie de la zone enfumée. La visibilité descend même sous les 10 m sur environ 150 m du côté France par rapport au foyer.

2.1.4 Toxicité

Les valeurs maximales de concentration en CO dans la zone enfumée sont de l'ordre de 300 ppm. Ces valeurs permettent à un usager se trouvant dans la fumée de survivre au moins une heure, en tenant compte uniquement du CO et non de l'effet irritant ou de l'obstruction des voies respiratoires causés par les suies.

2.2 Phase de désenfumage (à partir de 17:50:25)

2.2.1 Mouvement des fronts de fumée

La faible différence de pression entre les têtes permet de contrôler le courant d'air et donc de ramener le front de fumée côté France dans la zone d'extraction. La diminution du courant d'air au droit du foyer conduit en même temps au développement d'une nappe de fumée côté Italie. L'évolution temporelle des profils de vitesse dans l'ouvrage est donnée sur la figure 1.

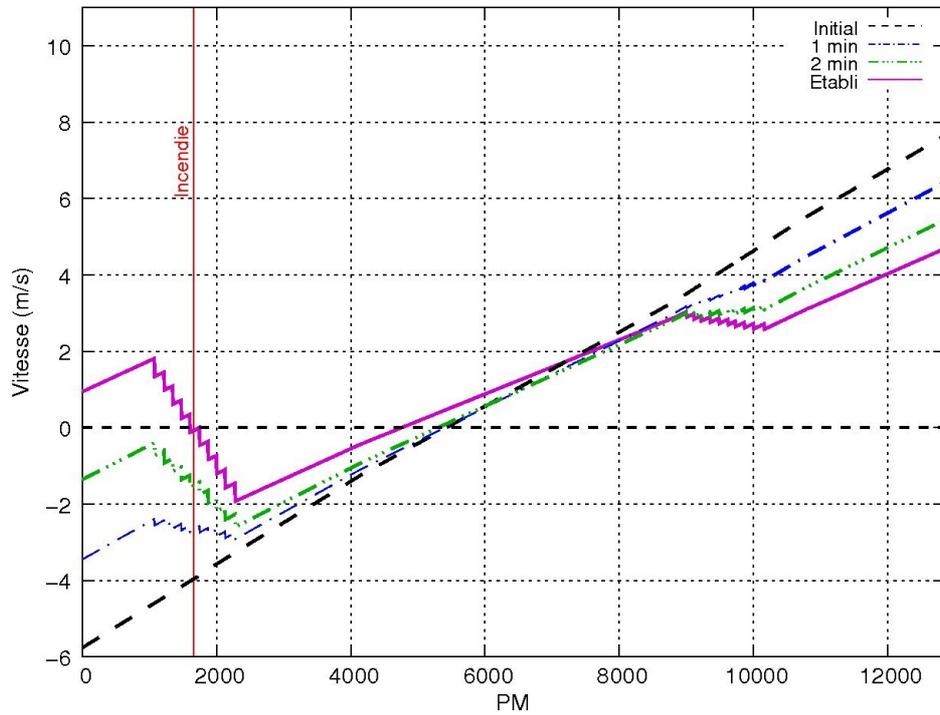


Figure 1 : évolution des profils de vitesse dans le tunnel avant et après mise en marche du désenfumage.

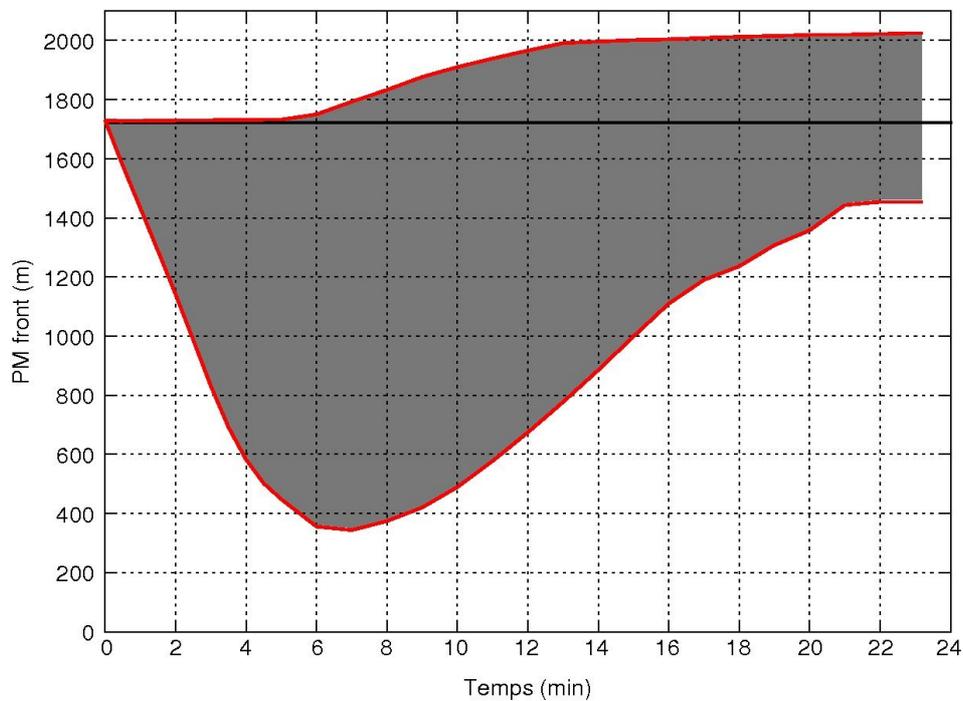


Figure 2 : Déplacement des fronts de fumée obtenu par simulation 3D. La partie grisée représente la zone enfumée.

Côté France, le ralentissement du front de fumée devient sensible après 4 minutes d'incendie (17:52:25), soit 2 minutes après le lancement du désenfumage. Rappelons que l'incendie n'atteint sa pleine puissance qu'au bout de 11 minutes et 36 secondes (18:00:01). Le front s'arrête et commence à refluer vers le foyer après 7 minutes environ (17:55:00). Il revient à une vitesse nettement plus lente que sa vitesse de progression initiale. La vitesse de recul du front est comprise entre 1,5 et 1,9 m/s dans la phase la plus « rapide » (de 17:58:00 à 18:04:00 environ).

Côté Italie, la nappe de fumée commence à se développer environ 5 minutes après le début de l'incendie, soit au moment où le désenfumage arrive à plein régime. La progression du front est assez lente car elle se fait toujours contre le courant d'air. Par ailleurs, une trappe de désenfumage se trouve à proximité immédiate du PL A dans cette direction, ce qui permet d'extraire « à la source » des fumées très chaudes, réduisant ainsi la « force motrice » de la nappe de fumée. À partir de 18:01:00 environ (13 minutes d'incendie), le front de fumée se stabilise pratiquement aux alentours du PM 2000.

Les figures 2 et 3 représentent le déplacement des fronts de fumée des deux côtés de l'incendie ainsi que l'évolution de la longueur de tunnel enfumée (distance entre les deux fronts). Cette longueur atteint un maximum de plus de 1400 m, reste supérieure à 1000 m pendant près de 12 minutes et se stabilise finalement à un peu moins de 600 m.

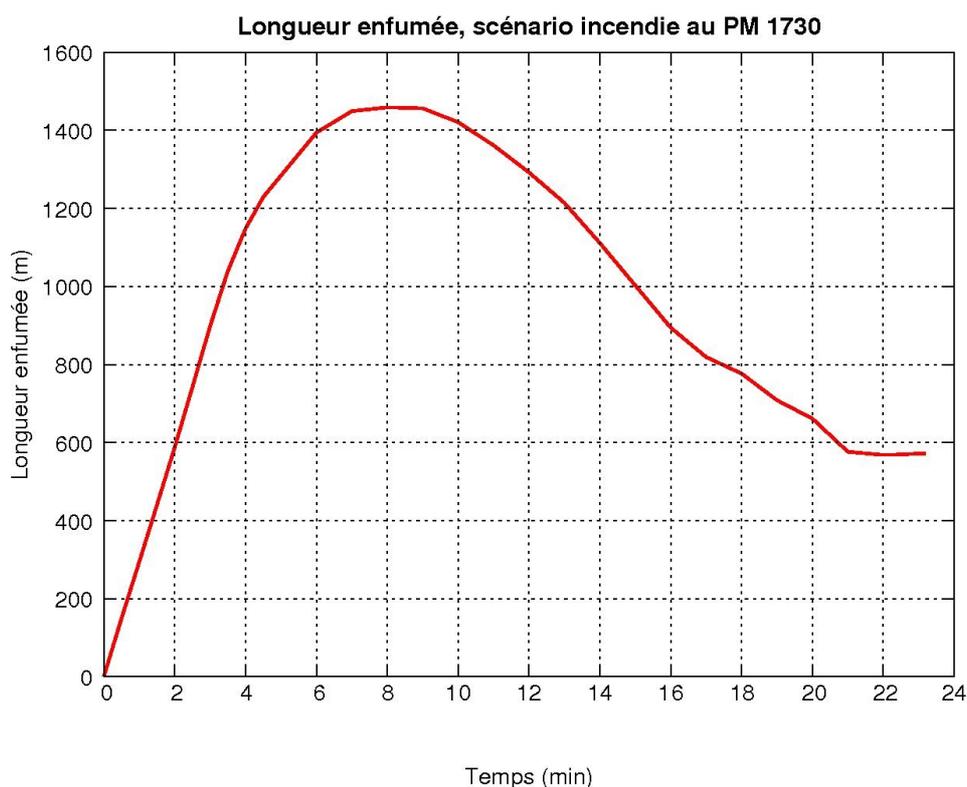


Figure 3 : évolution de la longueur de tunnel enfumée obtenue par simulation 3D.

2.2.2 Températures

L'augmentation des températures va de pair avec la baisse progressive du courant d'air longitudinal et la croissance de la puissance de l'incendie. Tant que le désenfumage n'a pas atteint son régime nominal de fonctionnement, le courant d'air reste suffisamment fort pour faire baisser les températures sous les 200°C presque partout. Les températures à hauteur d'homme sont partout supportables, toutefois certains équipements en plafond comme le câble radio peuvent subir des dégâts au droit du foyer.

Les températures commencent à s'élever fortement au moment où la nappe de fumée commence à se développer côté italien, c'est-à-dire après environ 5 minutes d'incendie. On voit alors apparaître une zone chaude entre le foyer et la première trappe en direction de la France ; dans cette zone, les températures à hauteur d'homme sont supérieures à 150°C ; les températures en plafond à l'aplomb du PL A dépassent les 500°C.

En régime établi, où le courant d'air est très faible au droit de l'incendie, on obtient des températures supérieures à 1000°C en plafond au-dessus du PL A ; la température en plafond dépasse 500°C sur environ 70 m de part et d'autre du PL A.

Dans le même régime établi, côté Italie la température est supérieure à 200°C sur presque toute la section entre les PL A et B. On remarque ensuite une nette restratification thermique ; entre les PL B et C, les températures sont un peu plus faibles (autour de 100°C pour un piéton qui se baisserait). Les températures deviennent acceptables au-delà du PL C avec moins de 50°C en partie basse. Ce phénomène de restratification s'explique par une interaction assez complexe entre la couche de fumée, la couche d'air frais et l'obstacle constitué par le camion. Il est cependant probable qu'il soit exagéré par les simplifications introduites dans la modélisation, notamment le fait de ne pas représenter l'espace libre sous les PL.

Côté France, l'absence de PL et donc d'effet de « bouchon » rend les températures supportables en partie basse à environ 50 m du foyer (température de l'ordre de 60 à 70°C). La décroissance des températures est ensuite assez rapide.

2.2.3 Visibilité

Durant tout le sinistre, la visibilité est mauvaise voire nulle dans toute la zone enfumée, à l'exception des extrémités une fois le régime permanent atteint. De chaque côté de l'incendie, au-delà de la dernière trappe extrayant effectivement de la fumée, il ne subsiste alors que peu de fumée et le courant d'air s'opposant à la propagation du front permet d'obtenir une stratification très marquée et stable sur une cinquantaine de mètres (phénomène dit de « backlayering » où une couche de fumée se maintient en plafond au-dessus d'un courant d'air longitudinal qui tendrait à la repousser).

2.2.4 Toxicité

En régime permanent, la stratification de l'écoulement est plus marquée que dans les scénarios précédents car la vitesse du courant d'air est quasi-nulle au droit du foyer ; elle était faible dans les autres cas mais déjà suffisante pour perturber l'écoulement. Si en pratique, la visibilité ne s'en trouve pas vraiment améliorée, les niveaux de toxicité sont en

revanche réduits. Si on excepte les extrémités bien stratifiées où l'air en partie basse est « frais », la concentration en CO à hauteur d'homme est de l'ordre de 100 à 500 ppm dans la zone enfumée, ce qui représente une baisse assez significative par rapport aux scénarios précédents. Les concentrations restent supérieures (de l'ordre de 700 voire 1000 ppm à hauteur d'homme, avec une couche supérieure où la concentration dépasse les 3000 ppm) entre les PL A et C. Reste le problème des suies dont il est difficile de quantifier l'impact sanitaire (effet irritant, obstruction des voies respiratoires). L'évolution temporelle des zones envahies par les fumées toxiques est donnée sur la figure 4.

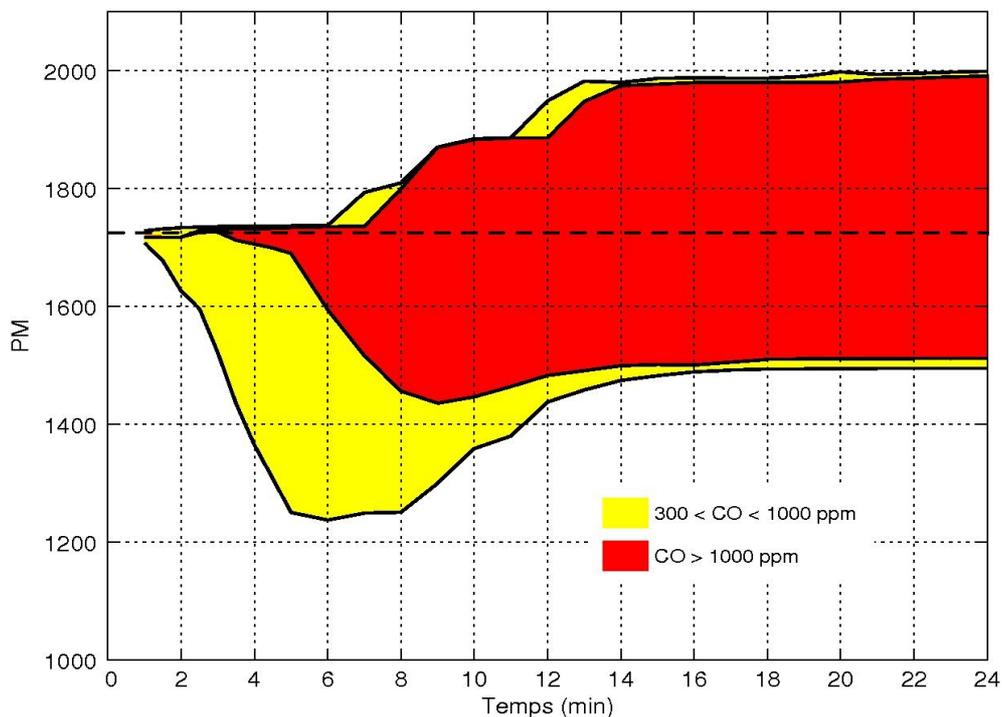


Figure 4 : évolution spatio-temporelle des zones envahies par des fumées toxiques (concentrations en CO supérieures à 300 et 1000 ppm) pour le scénario étudié en 3D.

La baisse des concentrations en CO par rapport aux autres scénarios est également visible dans les phases transitoires : le fort courant d'air du début de l'incendie permet de limiter la toxicité des premières fumées émises. La concentration en suies diminue dans les mêmes proportions mais les niveaux dangereux ne sont pas connus et les conséquences de cette baisse ne sont pas quantifiables.

2.2.5 Conditions de survie dans la zone temporairement envahie par les fumées

La figure 5 ci-dessous montre l'évolution de la concentration en CO subie par un usager se trouvant à différentes distances du foyer côté France en fonction du temps.

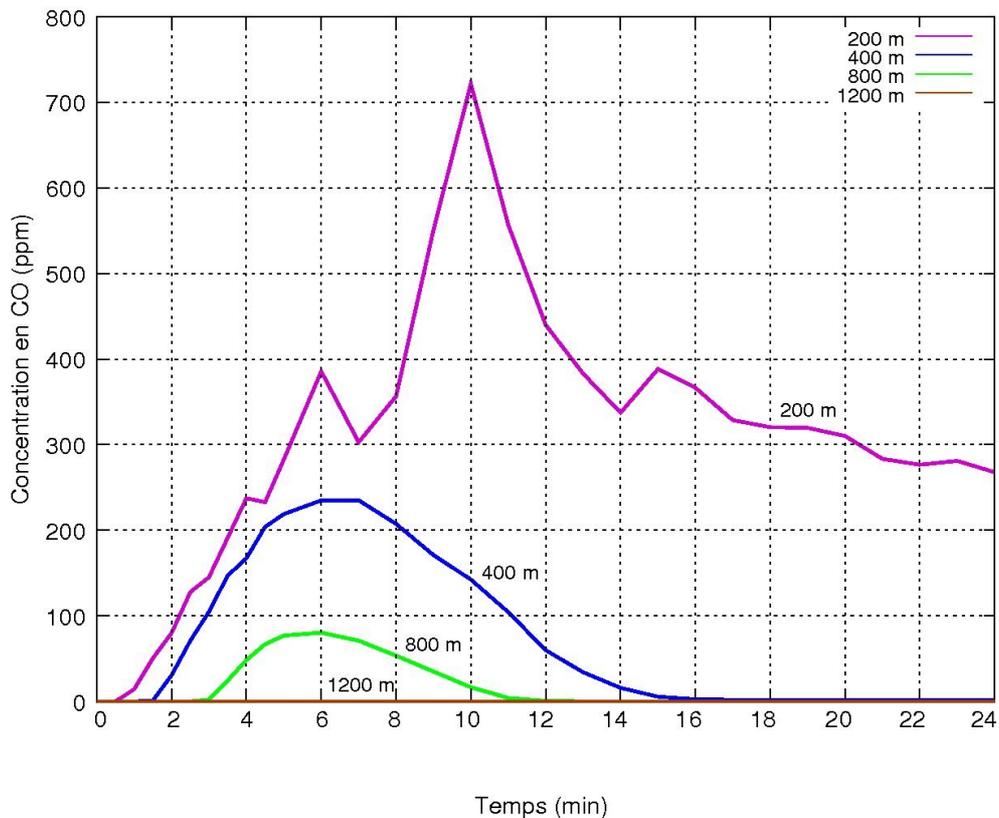
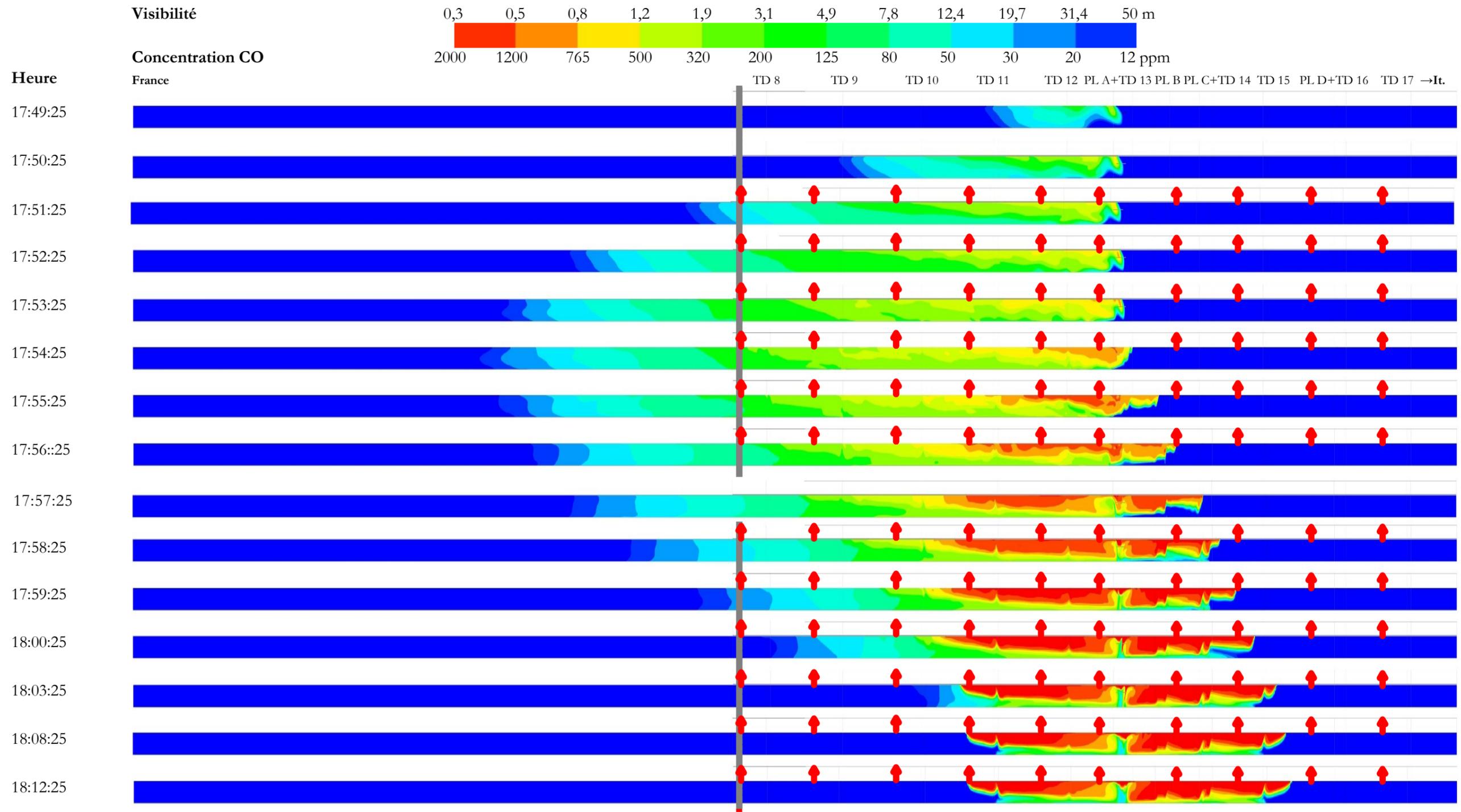


Figure 5 : Concentrations en CO à hauteur d'homme à différentes distances du foyer, côté France, en fonction du temps.

Hormis dans la zone constamment enfumée, les concentrations en CO n'atteignent pas de valeurs très dangereuses. Cela est dû à la forte dilution des premières fumées émises par l'incendie. Il faut toutefois se souvenir que les suies peuvent également être très nocives ; leur effet est difficile à quantifier.

2.3 Résultats détaillés

Les figures de la page suivante montrent l'évolution des distances de visibilité et des concentrations en CO sur l'ensemble du domaine de calcul.



2.4 Conclusions de l'étude tridimensionnelle et discussion du scénario

Ce calcul a montré l'importance du courant d'air initial en termes de sécurité des usagers. Le courant d'air est bien contrôlé en régime permanent mais en phase transitoire, même avec une réaction rapide de l'opérateur, la longueur enfumée dépasse 1400 m.

Le résultat trouvé pour le déplacement des fronts de fumée est à mettre en relation avec le comportement probable des usagers. Comme le 4 juin 2005, un certain nombre de véhicules auraient pu croiser le PL en feu avant que l'incendie ne prenne trop d'ampleur, et ensuite échapper aux fumées qui se déplacent à moins de 20 km/h.

Une représentation plus réaliste d'un tel scénario aurait pu comporter des véhicules arrêtés dans le tunnel côté France ; si on reprend la liste des véhicules entrés dans le tunnel le 4 juin 2005, on trouve 5 VL et un PL potentiellement arrêtés derrière le PL A et donc pris dans la fumée après un court instant. Les usagers arrêtés sous le vent de l'incendie auraient été atteints rapidement par le front de fumée (en une à trois minutes). Toutefois, ils seraient restés dans la fumée pendant une durée limitée et auraient eu de bonnes chances de survie.

Le calcul a également montré la sensibilité des conditions de visibilité et de toxicité vis-à-vis du courant d'air lorsque celui-ci est faible et que l'incendie est de forte puissance. Les grandes quantités de polluants produites font qu'un faible courant d'air suffit à dégrader fortement la visibilité et à rendre l'atmosphère dangereuse au fil du temps. La répartition des nappes de fumée entre les deux côtés de l'incendie est également sensible au courant d'air.

Pour un incendie de cette importance, il serait donc hasardeux de compter sur une stratification qui maintiendrait des conditions acceptables pour les usagers en dessous d'une couche de fumée située en plafond, compte tenu des nombreux facteurs difficiles à maîtriser qui interviennent.

3 Analyse monodimensionnelle et expertise des résultats pour différentes situations

3.1 Pertinence et faisabilité d'une analyse monodimensionnelle « experte »

La commande du désenfumage du tunnel du Fréjus est aujourd'hui fondée sur le découpage géographique de l'ouvrage en 9 tronçons représentant chacun une position standard d'incendie. En fonction de la localisation du feu et de la différence de pression entre les têtes, un scénario de contrôle du courant d'air préprogrammé est lancé. La plage de différences de pression possibles étant divisée en 15 intervalles, il existe 135 scénarios de désenfumage. On a également ajouté aux 9 positions standard 6 positions dites « intercantons », pour lesquelles deux cantons de désenfumage différents doivent être utilisés. Le nombre total de scénarios de désenfumage se monte donc à 225. Simuler ces 225 scénarios en 3D serait extrêmement lourd.

On a vu que pour un incendie tel que celui du 4 juin 2005, le principal paramètre de sécurité est la longueur de tunnel enfumée car les conditions dans la zone enfumée sont le plus souvent très dégradées ; on ne peut pas affirmer, même dans une situation où le courant d'air est bien contrôlé, que l'atmosphère sera vivable dans la zone enfumée grâce à la stratification.

Les avancées récentes en matière de phénoménologie de l'incendie en tunnel nous permettent de dire que la vitesse de déplacement d'un front de fumée, et donc la longueur de tunnel enfumée en fonction du temps, dépendent d'un nombre réduit de paramètres :

- la puissance de l'incendie,
- la vitesse du courant d'air longitudinal au droit du feu et au voisinage du front,
- les pertes de chaleur,
- les débits extraits et l'efficacité de l'extraction.

Les calculs de reconstitution de l'incendie du 4 juin 2005 suggèrent que pour les longues distances que nous considérons ici, la propagation du front dépend assez peu de la puissance de l'incendie. On peut expliquer cela par le fait qu'un incendie puissant induit dans son voisinage des températures très élevées, et donc des pertes de chaleur également élevées. Les pertes de chaleur compensent donc une partie de la puissance de l'incendie. En outre, dans les modèles théoriques de propagation de front, la vitesse du front est proportionnelle à la racine cubique de la « puissance thermique » qui l'alimente ; la dépendance est donc assez faible.

Les vitesses du courant d'air au droit de l'incendie et au voisinage du front et le débit d'extraction sont très fortement liés *via* la conservation de la masse des gaz en cause. L'efficacité de l'extraction est également liée aux vitesses de la fumée de part et d'autre des trappes. La vitesse de progression du front est donc, pour ce long tunnel, essentiellement conditionnée par la vitesse du courant d'air, qui peut facilement être calculée par un modèle monodimensionnel. Cela ne signifie cependant pas que le front soit « transporté » par le

courant d'air comme un élément passif. L'analyse des calculs précédents montre que le front peut se propager contre le courant d'air si celui-ci est faible.

3.2 Analyse du cas précédent

À titre d'exemple, la figure 6 montre le lien qui peut être fait entre la vitesse de déplacement du front et la vitesse du courant d'air au voisinage du front pour le cas étudié en 3D dans la présente phase. On s'intéresse au côté France par rapport au PL A, c'est-à-dire le plus sérieusement concerné par l'enfumage.

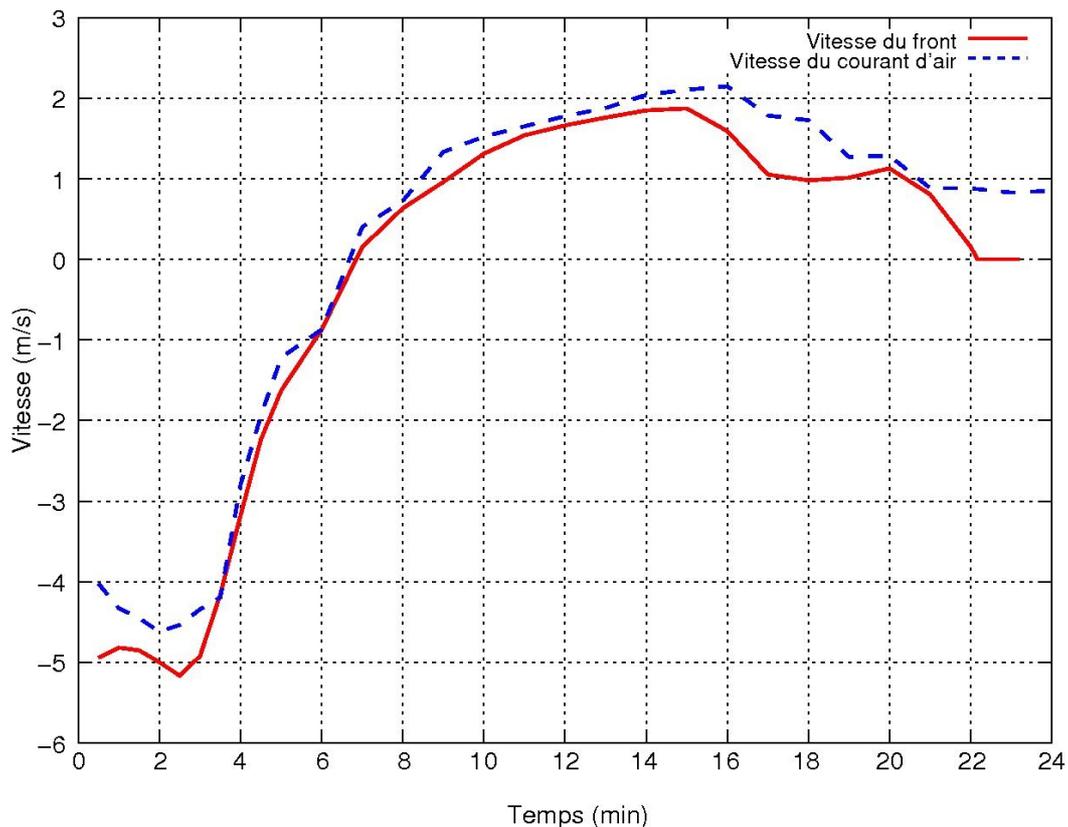


Figure 6 : Comparaison des vitesses du front de fumée et du courant d'air à son voisinage.

On remarque que l'évolution des deux courbes est très similaire. La vitesse du front est toujours inférieure (en valeur algébrique) à celle du courant d'air. Ainsi, au début de l'incendie, le front se déplace vers la France plus vite que le courant d'air ; ensuite il revient vers le foyer moins vite que le courant d'air. La différence de vitesse est d'autant plus marquée que le front se trouve près du foyer, à cause de la différence de puissance thermique « alimentant » le front. On note également qu'une vitesse de courant d'air d'environ 0,8 m/s permet d'arrêter le front de fumée. Il existe des exceptions, notamment liées à des changements de régime de ventilation.

Il faut garder à l'esprit que même si elle est faible, la différence de vitesse entre front et courant d'air existe toujours. Cela signifie qu'un courant d'air adverse minimal est toujours nécessaire pour arrêter un front de fumée, et *a fortiori* pour le faire reculer. Il faut également noter que la différence de vitesse pendant les 3 premières minutes est importante. Avec un

courant d'air plus faible, la différence serait encore supérieure. La prédiction de la longueur maximale enfumée sera sensible à l'appréciation de la vitesse initiale.

Rappelons enfin que la vitesse du courant d'air qui régit le déplacement du front de fumée est essentiellement la vitesse au voisinage du front et non celle au droit de l'incendie. Pour étudier le déplacement d'un front dans une zone où le courant d'air varie fortement (zone d'extraction par exemple), il faut donc calculer à intervalles de temps réguliers la nouvelle position du front et la vitesse du courant d'air à cet endroit.

La méthode générale est donc la suivante :

- Calculer les vitesses d'air dans le tunnel au début de l'incendie, par exemple à l'aide d'un code 1D.
- En déduire la vitesse initiale du ou des fronts de fumée (réalisable à l'aide d'un modèle physique simple).
- Calculer la position du front au pas de temps suivant (de l'ordre de la minute).
- Recalculer la vitesse de l'air au voisinage du front.
- Recalculer la vitesse du front, la position du front, etc.

3.3 Étude de quelques situations non simulées en 3D

Cette méthode est maintenant appliquée à différents scénarios non simulés en 3D. On considérera des situations correspondant aux seuils de différence de pression pris en compte dans le règlement de circulation du tunnel : 450 Pa pour les premières mesures de restriction du trafic (interdiction des marchandises dangereuses, escorte des autocars) et 600 Pa pour la fermeture aux poids lourds. Les emplacements choisis pour l'incendie sont les PM 8130 (situé assez près du milieu de l'ouvrage mais à un endroit où le courant d'air est assez mal contrôlable, d'où un risque d'enfumage étendu) et 10730 (proche de la tête italienne ; le contrôle du courant d'air est également difficile mais la longueur enfumée est réduite).

3.3.1 Différence de pression de 450 Pa, incendie au PM 8130

La figure 7 ci-après montre les profils de vitesse dans l'ouvrage :

- en ventilation sanitaire avec un soufflage à 40% sur tout le tunnel ;
- une minute après l'activation du désenfumage ;
- deux minutes après l'activation du désenfumage ;
- en régime de désenfumage établi.

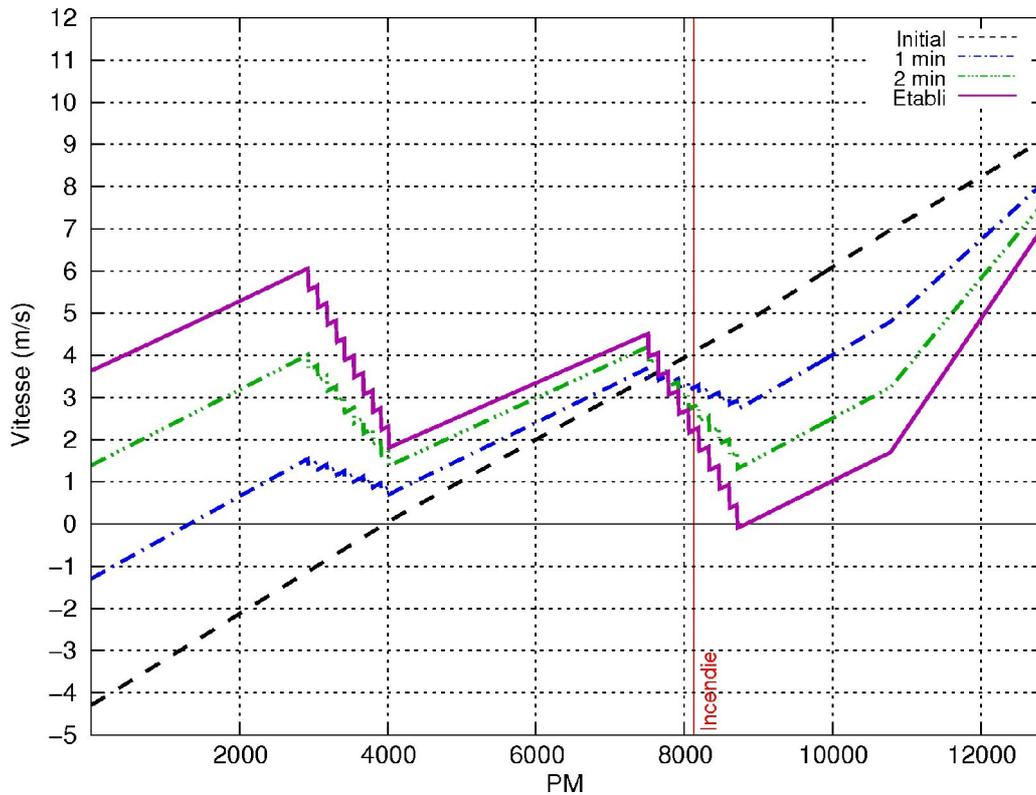


Figure 7 : Profils de vitesse dans le tunnel pour le cas +450 Pa, incendie au PM 8130, en régime initial et à différents instants après la mise en route du désenfumage.

Au début de l'incendie, les fumées sont poussées vers la tête italienne par un courant d'air de 4 m/s environ. On peut estimer la vitesse du front à environ 5 m/s pendant 2 minutes. Les fumées sortent donc de la zone d'extraction au bout de 2 minutes. Le courant d'air n'est ensuite jamais inversé dans la zone enfumée ; le front continue donc sa progression jusqu'à la tête italienne, à une vitesse d'abord lente, puis de plus en plus rapidement, notamment dans la zone où le soufflage est actif à plein régime. On peut estimer le délai d'enfumage complet du tunnel à une vingtaine de minutes.

Du côté France, en revanche, on rencontrera au maximum une petite nappe de retour allant jusqu'à la première trappe.

3.3.2 Différence de pression de 600 Pa, incendie au PM 8130

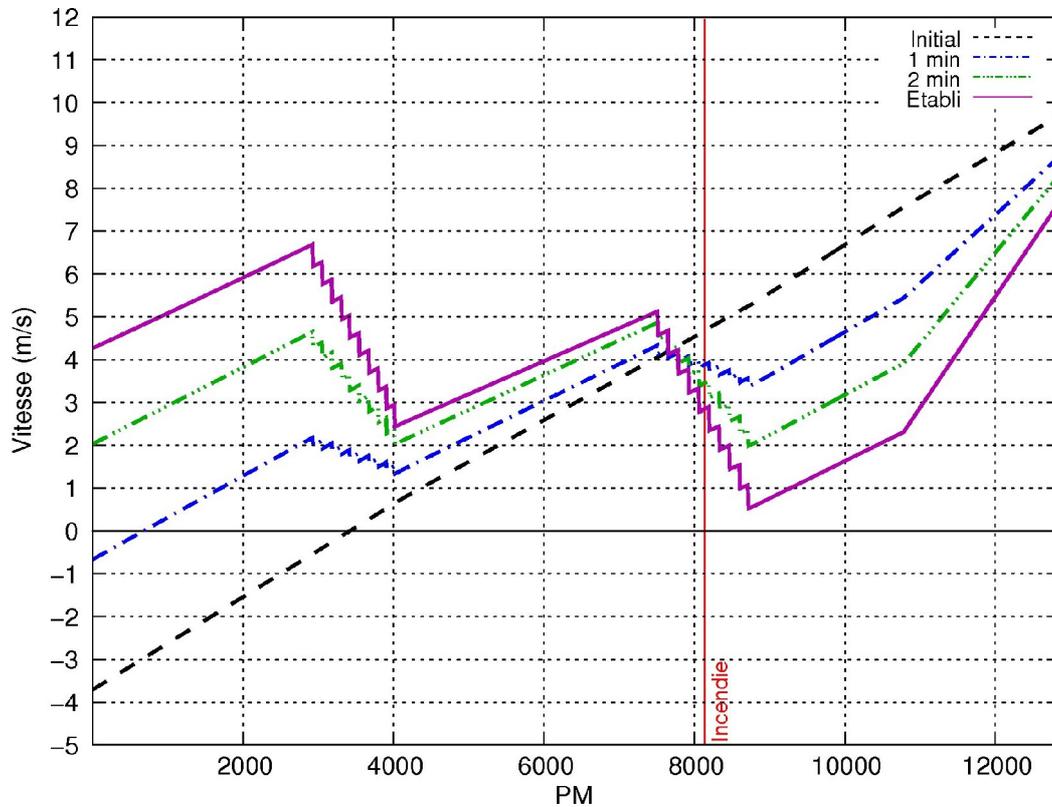


Figure 8 : Profils de vitesse dans le tunnel pour le cas +600 Pa, incendie au PM 8130, en régime initial et à différents instants après la mise en route du désenfumage.

L'analyse qualitative est identique à celle du cas précédent ; l'enfumage du tunnel sera cependant un peu plus rapide. Aucune nappe de retour ne devrait apparaître côté France.

Le déplacement des fronts de fumée dans ces deux premières situations est récapitulé sur la figure 7 ci-dessous.

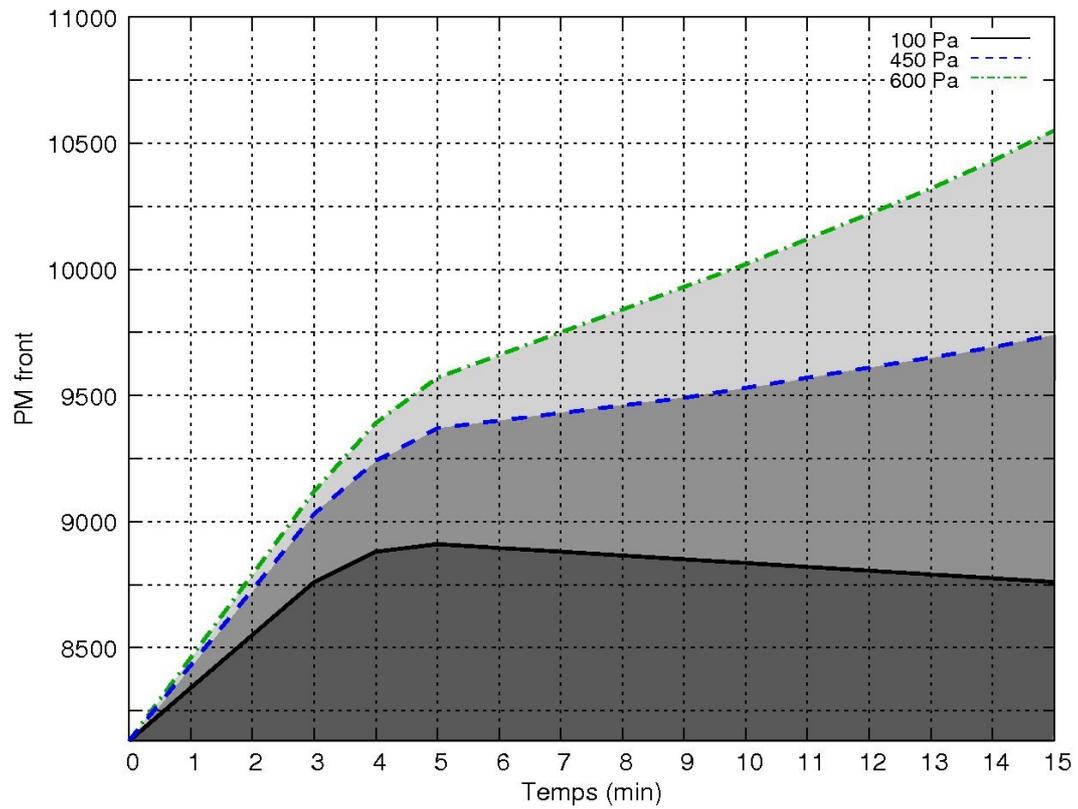


Figure 9 : Déplacement estimé du front de fumée côté Italie pour un incendie au PM 8130, pour des différences de pression atmosphérique entre têtes de 450 et 600 Pa.

3.3.3 Différence de pression de 450 Pa, incendie au PM 10730

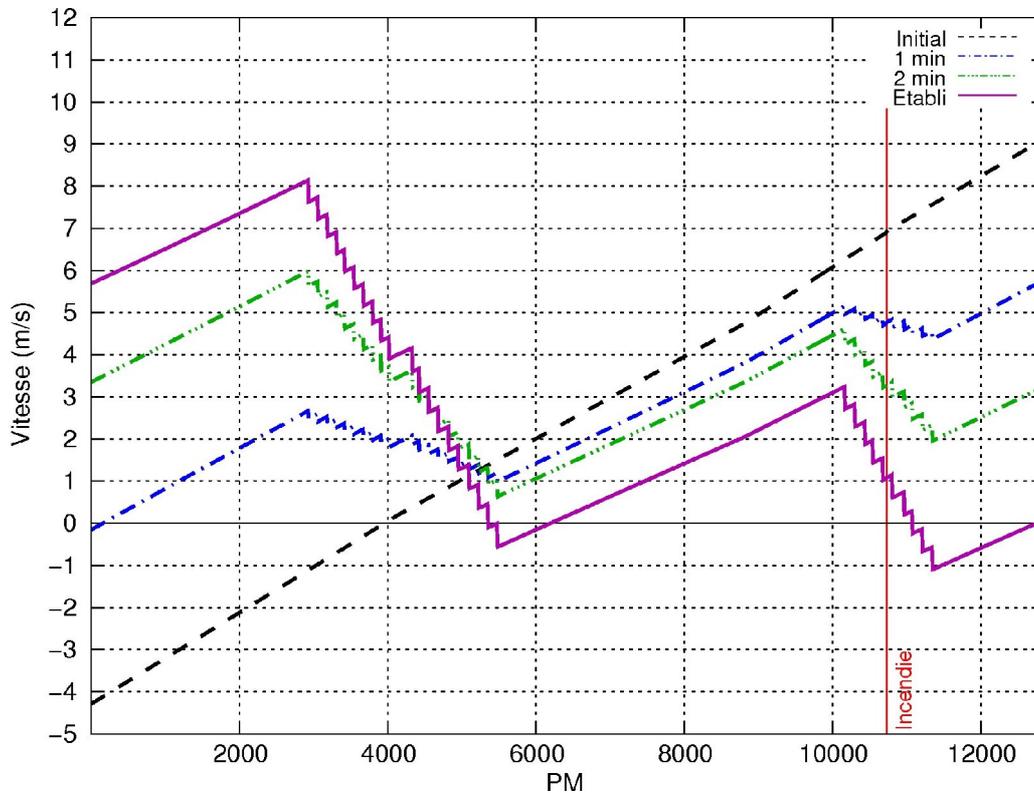


Figure 10: Profils de vitesse dans le tunnel pour le cas +450 Pa, incendie au PM 10730, en régime initial et à différents instants après la mise en route du désenfumage.

Le courant d'air en extrémité de zone d'extraction est d'environ -1 m/s, donc en principe suffisant pour empêcher la progression du front. Cependant, le courant d'air initial est très fort ($+7$ m/s au droit de l'incendie) et va donc fortement dégrader la situation dans les premières minutes. Le tableau ci-dessous résulte de l'application de la méthode de suivi du front.

Temps (min incendie)	Temps (min désenfumage)	PM front	Vitesse courant d'air au front (m/s)	Vit. déplacement front (m/s)
0	---	10730	+7	+7
1	---	11150	+7	+7
2	0	11570	+8	+8
3	1	12050	+5	+5
4	2	12350	+2,5	+3
5	3	12530	0	+0,5
6	4	12560	0	+0,5

Dans les minutes suivantes, la présence de vitesses négatives entre le foyer et le front de fumée permettra très certainement de faire refluer le front même avec une vitesse quasi-nulle au droit de celui-ci. Ce recul sera cependant très lent, probablement de l'ordre de $0,5$ m/s en moyenne, ce qui permet d'estimer à environ 30 minutes le temps nécessaire

pour ramener le front au droit de la dernière trappe active. Par ailleurs, une nappe de retour va se développer du côté France par rapport au foyer. Étant donné le délai nécessaire pour maîtriser les fumées, d'une part, et la difficulté posée par la nappe de retour pour l'intervention sur le foyer d'autre part, on peut s'interroger sur la réalité du gain en sécurité par rapport à un cas moins bien contrôlé où la fumée sortirait par la tête italienne (ce qui est déjà pratiquement le cas) mais ne se propagerait pas du tout vers la France. Le courant d'air plus fort au droit du feu permettrait également une dilution des fumées.

Notons également que le fort courant d'air initial diluera fortement les fumées ; la toxicité des fumées arrivant à proximité de la tête italienne sera très limitée.

3.3.4 Différence de pression de 600 Pa, incendie au PM 10730

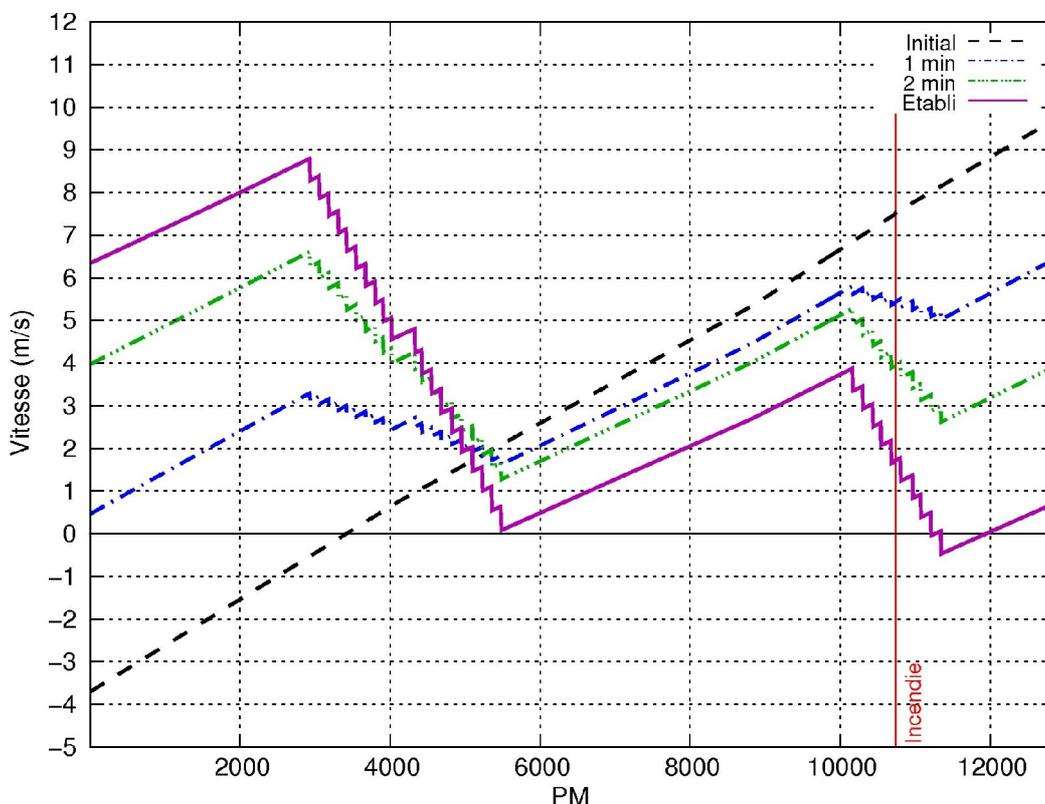


Figure 11: Profils de vitesse dans le tunnel pour le cas +600 Pa, incendie au PM 10730, en régime initial et à différents instants après la mise en route du désenfumage.

Le contrôle du courant d'air est dégradé par rapport au cas précédent. On applique à nouveau la méthode de suivi du front :

Temps (min incendie)	Temps (min désenfumage)	PM front	Vitesse courant d'air au front (m/s)	Vit. déplacement front (m/s)
0	---	10730	+7,5	+7,5
1	---	11180	+8	+8
2	0	11660	+8,5	+8,5
3	1	12170	+5,5	+5,5
4	2	12500	+3,7	+3,7
5	3	12722	+0,8	+1
6	4	12782	+0,8	+1

Le front va continuer sa progression jusqu'à sortir du tunnel par la tête italienne. Les vitesses négatives existent vers l'extrémité de la zone d'extraction mais ne seront cette fois probablement pas suffisantes pour faire refluer le front, du moins dans un délai permettant de garantir la survie des usagers dans le tunnel. En revanche, la nappe de retour côté France sera très réduite, voire inexistante, facilitant l'attaque du feu de ce côté.

Le déplacement du front côté Italie est représenté sur la figure 10 ci-dessous, pour les deux situations ci-dessus.

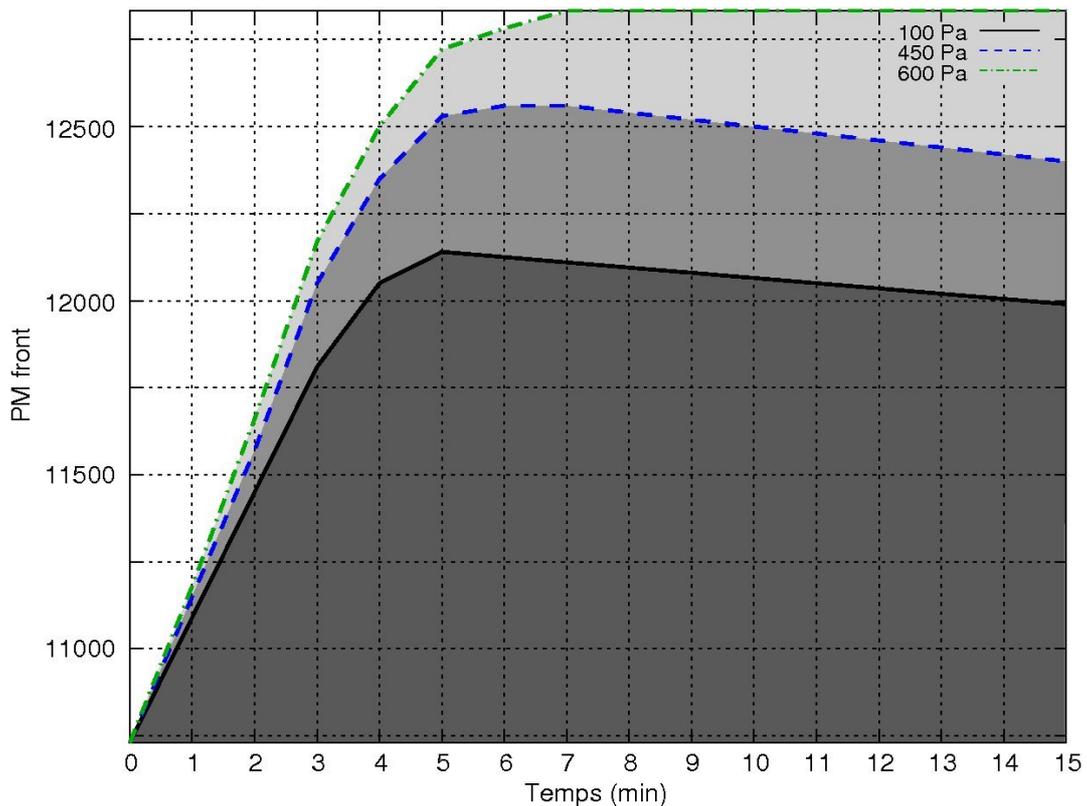


Figure 12 : Déplacement estimé du front de fumée côté Italie pour un incendie au PM 10730, pour des différences de pression atmosphérique entre têtes de 450 et 600 Pa.

4 Conclusions de la phase 4

L'objectif de cette phase était d'évaluer le comportement des fumées dans des conditions plus défavorables, notamment dans les premières minutes du sinistre, que celles qui prévalaient le 4 juin 2005.

Le premier scénario, simulé en 3D, comportait une vitesse de courant d'air initial assez forte (4 m/s) et un très bon contrôle du courant d'air en régime établi. Les résultats montrent que durant la phase transitoire, une grande longueur d'ouvrage peut être enfumée (plus de 1400 m ici). Le contrôle quasi-idéal du courant d'air permet de ramener les fumées à l'intérieur de la zone d'extraction assez rapidement et de stabiliser leur position en une vingtaine de minutes.

La seconde partie de cette phase a consisté à caler et à appliquer une méthode d'estimation des déplacements de fronts de fumée à partir de calculs 1D. Les scénarios choisis sont plus difficiles à gérer que celui simulé en 3D, d'une part à cause du courant d'air initial souvent plus fort, d'autre part à cause du contrôle du courant d'air dégradé par de fortes différences de pression atmosphérique entre les têtes. On a choisi pour les différences de pression les seuils correspondant à l'application de mesures d'exploitation spécifiques.

La zone d'extraction sera enfumée en grande partie dans la plupart des cas. L'analyse des scénarios « limites » doit donc porter essentiellement sur la sécurité des zones plus éloignées du foyer, où le danger peut en outre être augmenté par le défaut de perception du sinistre par les usagers. De ce point de vue, les résultats sont les moins satisfaisants dans le cas de l'incendie au PM 8130 avec une différence de pression de 450 Pa. La propagation du front de fumée du côté italien n'est pas maîtrisée, pouvant conduire à l'enfumage de près de 5 km de tunnel.

Cependant, il convient de prendre en compte les conditions d'intervention des secours dans l'ouvrage. L'envahissement par des fumées fortement toxiques de secteurs situés hors de la zone d'extraction se fait au bout d'un temps généralement supérieur à 10 minutes, ce qui, dans le cas du tunnel du Fréjus, est nettement supérieur au délai d'arrivée des secours compte tenu de l'existence de deux postes en tunnel en plus de ceux situés aux têtes. Des mesures comme l'accompagnement des autocars devraient également s'avérer efficaces avec de tels délais, sauf peut-être dans des cas très particuliers (grand nombre de personnes âgées ou handicapées).

Par ailleurs, sa longueur de la zone d'extraction va prochainement être significativement réduite par la diminution du nombre de trappes utilisées pour le désenfumage (de 10 petites trappes à 4 ou 5 grandes trappes, avec un débit identique).