

**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 2  
Reconstitution de l'incendie**

**Septembre 2007**



*Liberté • Égalité • Fraternité*

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

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



## Sommaire

<b>1 Scénarios d'incendie étudiés.....</b>	<b>4</b>
1.1 Hypothèses communes à tous les calculs.....	4
1.2 Hypothèse de puissance basse : 30 MW.....	5
1.3 Hypothèse de puissance moyenne : 60 MW.....	5
1.4 Hypothèse de puissance forte : 90 MW.....	5
<b>2 Phase 2 – Reconstitution de l'incendie : résultats obtenus avec l'hypothèse 30 MW.....</b>	<b>7</b>
2.1 Phase initiale sans désenfumage (de 17:48:25 à 17:57:01).....	7
2.2 Phase de désenfumage (à partir de 17:57:01).....	12
2.3 Inflammation des PL B, C et D.....	15
2.4 Conclusion sur l'hypothèse 30 MW.....	15
<b>3 Phase 2 – Reconstitution de l'incendie : résultats obtenus avec l'hypothèse 60 MW.....</b>	<b>16</b>
3.1 Phase initiale sans désenfumage (de 17:48:25 à 17:57:01).....	16
3.2 Phase de désenfumage (à partir de 17:57:01).....	18
3.3 Inflammation des PL B, C et D.....	22
3.4 Résultats détaillés.....	22
3.5 Conclusion sur l'hypothèse 60 MW.....	26
<b>4 Phase 2 – Reconstitution de l'incendie : résultats obtenus avec l'hypothèse 90 MW.....</b>	<b>27</b>
4.1 Phase initiale sans désenfumage (de 17:48:25 à 17:57:01).....	27
4.2 Phase de désenfumage (à partir de 17:57:01).....	29
4.3 Inflammation des PL B, C et D.....	31
4.4 Conclusion sur l'hypothèse 90 MW.....	31
<b>5 Remarques générales.....</b>	<b>33</b>
5.1 Stratification des fumées avant la mise en route du désenfumage.....	33
5.2 Efficacité du désenfumage.....	34
5.3 Influence de l'inflammation des PL B, C et D sur les résultats.....	35
<b>6 Conclusions des calculs de reconstitution.....</b>	<b>37</b>
6.1 Conditions ayant régné pendant le sinistre.....	37
6.2 Puissance thermique.....	37

# 1 Scénarios d'incendie étudiés

## 1.1 Hypothèses communes à tous les calculs

Pour tous les calculs, le scénario de ventilation est identique. Les débits de soufflage sont spécifiés en utilisant les données GTC disponibles. En effet, les débits réels ne correspondent pas exactement aux valeurs théoriques (40%, puis 30% du plein régime). Le débit d'extraction en mode désenfumage est de  $220 \text{ m}^3/\text{s}$  à température ambiante ; on a donc entré la valeur de débit massique de  $226 \text{ kg/s}$  dans le code, en supposant que les gaz extraits se refroidissaient jusqu'à la température ambiante lors de leur parcours dans la gaine. Tous les débits subissent une variation linéaire sur 3 minutes à compter de la sélection de la niche 50 par le régulateur (17:57:01 soit  $t=516 \text{ s}$  dans la simulation, qui démarre à 17:48:25).

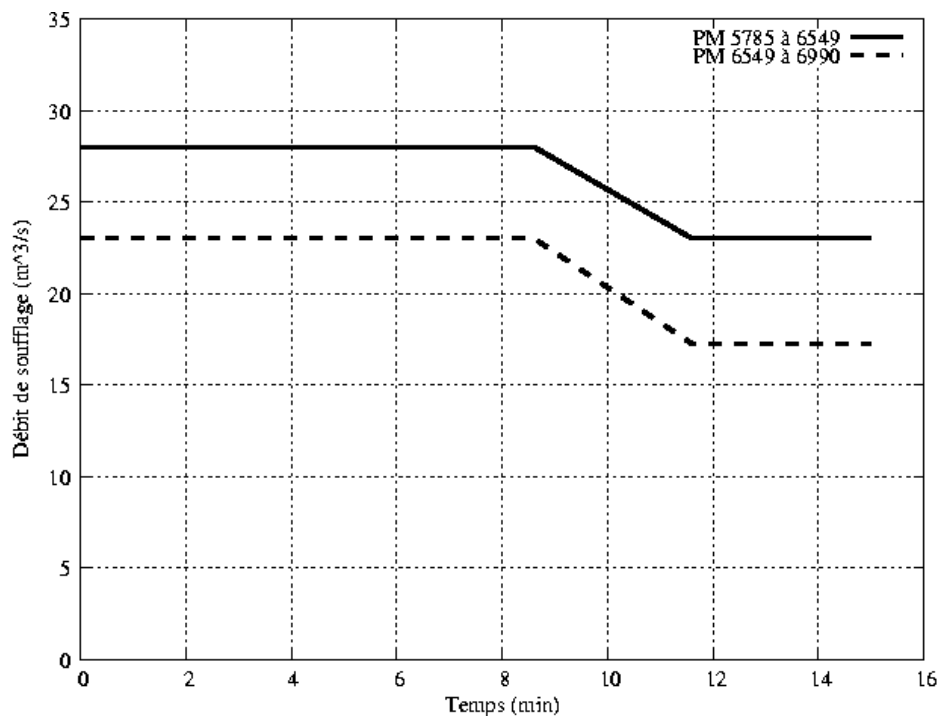


Figure 1: Evolution des débits de soufflage injectés dans le domaine de calcul (le domaine se situe à cheval sur deux cantons de soufflage)

La différence de pression entre les limites du domaine est calée par des calculs isothermes en régime permanent et varie elle aussi linéairement en fonction du temps.

Rappelons ici les principaux résultats des calculs monodimensionnels effectués par le Cetu et inclus dans le rapport provisoire d'enquête du BEA-TT : le courant d'air au droit du foyer au début de l'incendie était de  $0,5 \text{ m/s}$  environ. Une fois le plein régime de désenfumage atteint, le courant d'air au droit du foyer est de  $3 \text{ m/s}$  environ. Aux limites de la zone d'extraction, le courant d'air converge vers le foyer. Sa vitesse est de  $3,5 \text{ m/s}$  environ côté France et  $1 \text{ m/s}$  côté Italie.

## 1.2 Hypothèse de puissance basse : 30 MW

Pour cette première simulation, on suppose que la puissance de l'incendie augmente linéairement de zéro à 30 MW en 7 minutes. Cette hypothèse différente de la courbe standard pour les ESD (30 MW en 10 minutes) se fonde sur les relevés d'avancée du front de fumée, notamment en amont du foyer, sur l'observation des vidéos et sur le caractère facilement inflammable du chargement. Le désenfumage ayant été activé plus de 8 minutes après le début de l'incendie, on suppose donc que le courant d'air longitudinal n'a pas d'influence sur la puissance du feu.

La variation linéaire suit les recommandations du guide des études spécifiques des dangers publié par le Cetu (*Guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers - fascicule 4 : les ESD*, Lyon, 2003).

## 1.3 Hypothèse de puissance moyenne : 60 MW

Pour l'hypothèse 60 MW, on pourra considérer que la puissance atteint 30 MW au bout de 7 minutes et continue à croître ensuite à la même vitesse avant la mise en route du désenfumage, puis de manière à atteindre 60 MW lorsque le courant d'air au droit du foyer est maximal (désenfumage à plein régime), soit au bout de 11 min 30 s. Ceci traduit une hypothèse de puissance « de base » plus élevée (montée linéaire à 50 MW environ en 10 minutes) et la prise en compte d'une certaine activation de la combustion par le courant d'air longitudinal. Ce scénario présente également l'avantage de réutiliser les résultats des 7 premières minutes du scénario précédent et d'économiser plus d'une semaine de calcul. La dérivée temporelle de la puissance vaut 4,3 MW/min avant la mise en route du désenfumage et 7,7 MW/min quand le désenfumage est actif.

## 1.4 Hypothèse de puissance forte : 90 MW

L'hypothèse 90 MW nécessite de spécifier une montée en puissance plus rapide au début de l'incendie. On ne pourra donc pas réutiliser les 7 premières minutes. On voit cependant sur les vidéos que le feu met un certain temps à se propager à la remorque. On peut donc raisonnablement réutiliser les 2 premières minutes pendant lesquelles on suppose que seul le tracteur brûle, puis augmenter la puissance jusqu'à 60 MW au moment de l'activation du désenfumage, pour finalement atteindre 90 MW lorsque le désenfumage fonctionne à plein régime.

La figure 2 récapitule les variations de puissance pour les trois hypothèses : 30, 60 et 90 MW.

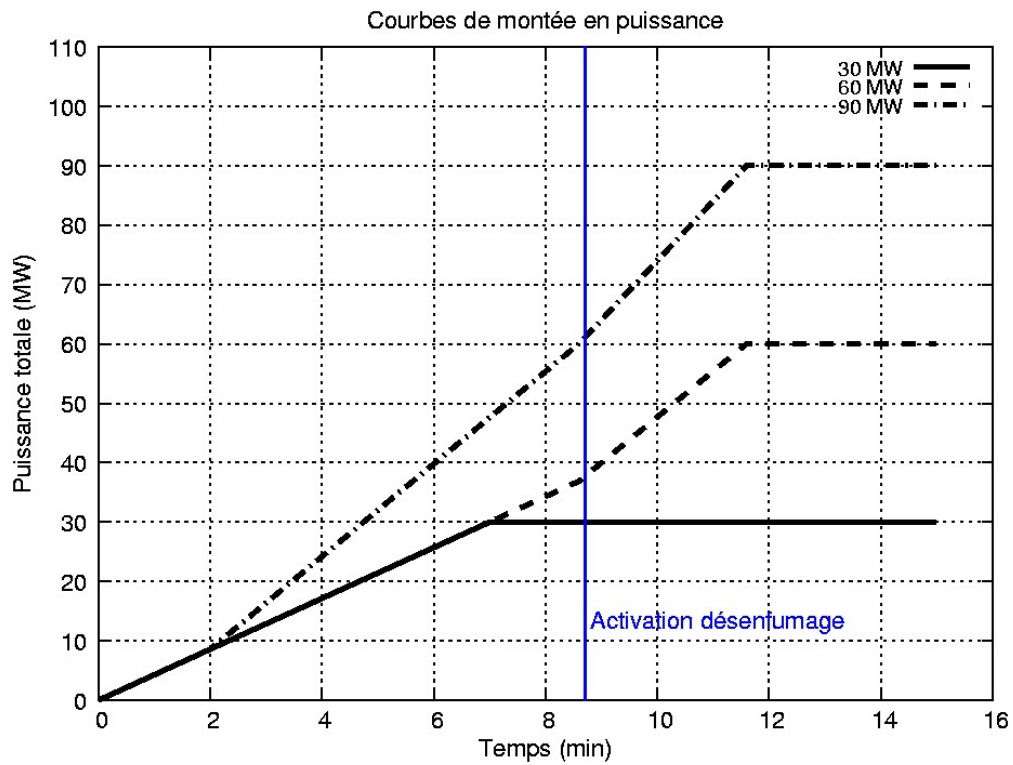


Figure 2 : Variation temporelle de la puissance thermique du foyer pour les trois hypothèses.

## 2 Phase 2 – Reconstitution de l'incendie : résultats obtenus avec l'hypothèse 30 MW

### 2.1 Phase initiale sans désenfumage (de 17:48:25 à 17:57:01)

#### 2.1.1 Courant d'air longitudinal et déplacement des fronts de fumée

Dans cette phase, le courant d'air calculé est inférieur à celui trouvé par simulation 1D. Il est orienté vers l'Italie mais sa vitesse n'est que de 0,15 m/s environ au droit du foyer. Les résultats ne devraient cependant pas être très différents avec la valeur calculée en 1D (0,5 m/s environ), sauf peut-être la longueur de la nappe de retour. La vitesse du courant d'air était conforme au calcul 1D dans la simulation isotherme qui a servi à définir les conditions initiales du calcul. Cependant, la perte de charge due à la présence des gaz chauds est sensible sur le tronçon simulé, dont la longueur est nettement plus faible que celle de l'ouvrage entier. La baisse de vitesse du courant d'air a donc certainement existé dans la réalité, mais elle a certainement été moins importante que ce que suggère la simulation. Ce phénomène est illustré (pour l'hypothèse 60 MW) par la figure 6, page 17.

La longueur de la nappe de retour est donc surévaluée. Le front de fumée sort du domaine de calcul et la vitesse du front est nettement plus élevée dans le calcul que dans la réalité. Toutefois, il est rare de parvenir à obtenir une bonne reproduction de la nappe de retour par simulation CFD.

Du côté italien, le calcul surestime fortement la vitesse du front dans les premiers instants de l'incendie. Cela est très probablement dû à une hypothèse de montée en puissance du feu peu conforme à la réalité. Le développement du sinistre a vraisemblablement suivi une courbe temps-puissance plus proche des lois en  $t^2$  utilisées en bâtiment que de la loi linéaire retenue. Il faudra, dans la suite, tenir compte de cette erreur pour l'interprétation des résultats et leur recouplement avec le scénario de l'événement.

Ensuite, le décalage tend à se résorber. Cela signifie que la vitesse du front est cette fois sous-estimée dans le calcul CFD. Trois facteurs peuvent expliquer cette erreur : une sous-estimation de la puissance du feu, une surestimation des pertes de chaleur et le courant d'air trop faible.

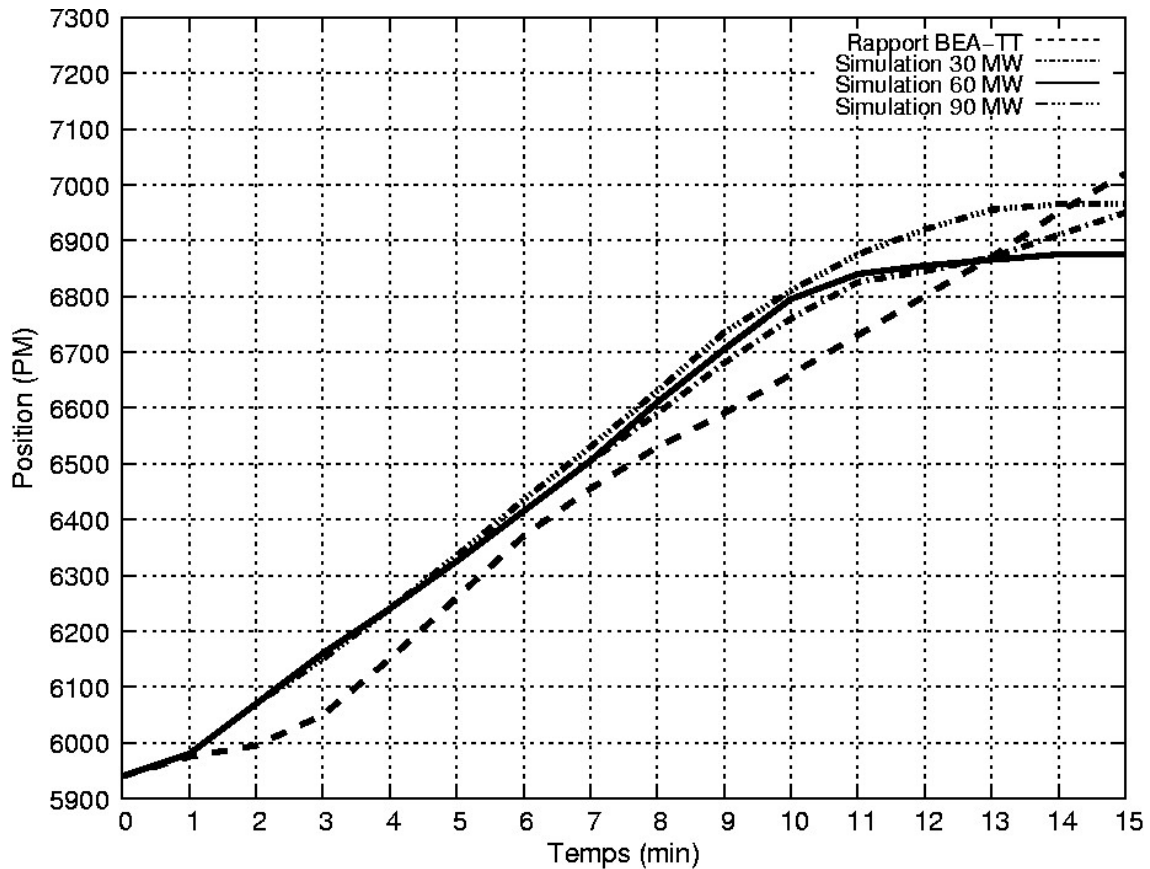


Figure 3 : Position du front de fumée côté italien du PL A, établie par le BEA-TT et calculée par simulation CFD.

L'erreur sur la position du front de fumée est cependant acceptable à la fin de la phase initiale. La figure représente l'évolution de la position du front telle que donnée par le rapport du BEA-TT en date du 1<sup>er</sup> mars 2006 et telle que calculée avec les hypothèses 30 MW, 60 MW et 90 MW.

## 2.1.2 Températures

La température n'est pas, du moins dans les premières minutes d'un incendie, la principale menace pour les usagers hors du voisinage immédiat du foyer. On commencera donc par examiner les températures subies par les équipements, notamment le câble radio.

Notons que les températures ont ensuite été considérablement augmentées dans certaines zones par l'inflammation des PL B, C et D. Les instants de démarrage de ces incendies sont inconnus. Les résultats du calcul ne peuvent donc être confrontés directement aux relevés de terrain que dans la zone située entre les PL A et B. Les dégâts dans ce secteur ont cependant suffi à mettre hors service des équipements importants sur une grande partie du linéaire d'ouvrage entre le PL A et l'abri 6 (coupure électrique par secteur).

Il faut également noter que les températures à proximité immédiate du foyer doivent être interprétées avec précaution. La température de l'air dans cette zone est très sensible aux détails de l'écoulement, au mélange turbulent local et à la géométrie de la zone de



combustion, qui sont modélisés de façon assez grossière. Il faut donc considérer les ordres de grandeur plutôt que les valeurs précises.

#### *Températures subies par les équipements en plafond*

On se base, pour cette partie, sur l'analyse du champ de température sur le plan vertical dans l'axe du tunnel, c'est-à-dire dans la zone où se trouve le câble rayonnant assurant les radiocommunications en tunnel.

Près du plafond, la température de l'air dépasse 200°C dès la première minute d'incendie, sur une longueur comparable à celle du PL A. Ces valeurs sont probablement surestimées car le développement initial de l'incendie a certainement été plus lent dans la réalité. Après 2 minutes, la zone où la température est supérieure à 200°C s'étend sur environ 40 m. Des valeurs supérieures à 400°C sont atteintes au droit du PL A. Les 500°C sont dépassés après 3 minutes. Lorsque le défaut du câble rayonnant est constaté après un peu moins de 8 minutes d'incendie, ce câble a été exposé à des températures d'air supérieures à 500°C pendant 5 minutes environ, et supérieures à 200°C pendant 7 minutes.

Les équipements d'éclairage ont subi des températures du même ordre et leur défaillance assez rapide s'explique bien : d'après les remontées d'alarmes, les premiers luminaires s'éteignent entre 4 et 5 minutes après le début de l'incendie et les températures calculées dépassent alors 500°C.

#### *Températures subies par les usagers, les secours et les équipements en partie basse*

Pendant toute la phase initiale, la température de l'air à hauteur d'homme ne dépasse pas 60°C, sauf à l'aval immédiat du foyer (entre les PL A et B). Les conditions se dégradent progressivement, à mesure que la puissance du foyer augmente.

La température de l'air ne représente donc pas un danger mortel pour les usagers avant la mise en route du désenfumage. Hormis ceux situés à proximité immédiate du foyer, les équipements situés en partie basse tels que les plots de jalonnement n'ont probablement pas subi de dégâts significatifs pendant cette phase. Il a cependant suffi qu'un plot de jalonnement se trouve dans la zone très chaude pour mettre hors service tous les plots de la zone.

#### *Températures subies par les structures de génie civil*

Au moment de la mise en route du désenfumage, la température de surface de la dalle de faux plafond dépasse ponctuellement 700°C au-dessus du foyer. On trouve des valeurs plus élevées sur le piédroit le plus proche du PL A : 1100°C environ. On peut trouver une raison physique à ce phénomène surprenant (rayonnement « piégé » du fait de la proximité des deux surfaces), mais la modélisation différente des transferts thermiques sur le plafond et le piédroit est certainement un facteur important.

Ces valeurs sont assez cohérentes avec les résultats des analyses du béton, qui laissent penser que la dalle n'a pas été soumise à des sollicitations thermiques extrêmes. Les températures des piédroits sont également cohérentes avec l'écaillage observé.

Lorsqu'on s'éloigne du foyer, la température des parois chute rapidement pour descendre sous les 200°C à quelques dizaines de mètres du PL A. Là encore, cela concorde avec les observations effectuées sur le terrain, qui ne montrent pas de dégradation significative du génie civil hors du voisinage immédiat des poids lourds brûlés.

### 2.1.3 Visibilité

La visibilité peut être estimée à partir de la valeur du traceur selon la formule proposée par Mulholland (Smoke Production and Properties. In *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Quincy, MA : SFPE/NFPA, 2002) : la distance de visibilité est inversement proportionnelle à la concentration en suies. On distingue la distance de visibilité des objets réfléchissants (murs, panneaux de signalisation, etc.) et celle des objets lumineux (plots de jalonnement, feux des abris, etc.), qui est plus de deux fois supérieure. Ce type d'analyse ne tient pas compte de l'occultation des luminaires par la fumée dense présente au plafond. Les résultats ne doivent de toute façon être interprétés que comme des ordres de grandeur, au vu notamment des incertitudes sur les termes sources.

Durant les 3 à 4 premières minutes de l'incendie, la visibilité à hauteur d'homme n'a donc probablement pas été réduite au point de rendre impossible la progression. Ensuite, les conditions se dégradent significativement à cause de la montée en puissance de l'incendie et du mélange progressif des fumées. Si on tient compte de l'occultation des luminaires par la fumée, de la mise hors service d'une partie de l'éclairage et des plots de jalonnement, la progression devient certainement très difficile alors que le courant d'air est encore faible.

### 2.1.4 Toxicité

Les victimes sont décédées suite à l'inhalation de suies et à une intoxication au monoxyde de carbone (CO). On peut évaluer la concentration en CO en utilisant les termes sources fournis par le guide des études spécifiques de danger établi par un groupe de travail coordonné par le Cetu. D'après ce document, un incendie de 30 MW bien ventilé (c'est le cas ici) produit 120 grammes de CO par seconde.

En utilisant le traceur passif, on calcule le champ de concentration en CO. Lors de cette première phase, la concentration en CO à hauteur d'homme reste supportable, avec des valeurs n'excédant pas 400 à 600 ppm (parties par million). D'après Purser (Toxicity assessment of combustion products. In *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3<sup>ème</sup> édition, SFPE/NFPA, 2002), de telles concentrations ne provoquent pas d'incapacité ou de perte de conscience. Il faudrait dépasser 1000 ppm pour observer des effets notables en 15 à 20 minutes. L'atmosphère dans laquelle se trouvaient les victimes à cet instant ne pouvait donc pas causer leur mort uniquement par intoxication au CO dans l'hypothèse de puissance 30 MW.

L'effet des suies est difficile à estimer. On peut cependant supposer que les concentrations assez extrêmes en suies peuvent causer d'importants dégâts aux voies respiratoires.

## 2.1.5 Conditions au voisinage du PL C

Nous nous intéressons ici plus particulièrement au PL C, où se trouvaient les deux chauffeurs qui ont finalement trouvé la mort dans l'incendie.

D'après le calcul, le front de fumée (stratifiée en plafond) arrive au PL C un peu plus de 2 minutes après le début de l'incendie, contre 3 minutes 30 sur le graphe établi par le BEA-TT. Cet écart peut s'expliquer par l'hypothèse de montée en puissance linéaire de l'incendie ; la croissance réelle du feu dans les premiers instants a été plus lente.

Une fois le PL C dans la fumée, les conditions de visibilité se dégradent assez rapidement aux alentours. Environ 3 minutes après l'arrivée du front de fumée, la visibilité est de l'ordre de 2 à 3 m avec une forte densité de fumée près du plafond qui occulte les luminaires. À cet instant, l'éclairage ne fonctionne plus qu'à 60 % et les plots de jalonnement sont éteints sur le piédroit opposé au PL C. Une minute plus tard, les conditions se sont encore dégradées, notamment en partie haute avec probablement une occultation quasi-totale des luminaires. Peu de temps après, la seconde ligne de plots de jalonnement s'éteint et les deux chauffeurs sont alors très probablement dans l'obscurité totale.

À la mise en route du désenfumage, la section plongée dans l'obscurité s'étend au moins jusqu'au PL D et les deux chauffeurs s'y trouvent encore.

La concentration en gaz toxiques dans l'atmosphère n'est pas très forte à hauteur d'homme lorsque les deux chauffeurs quittent leur véhicule. Un profil type de concentration qu'ils ont pu rencontrer est donné sur la figure 4.

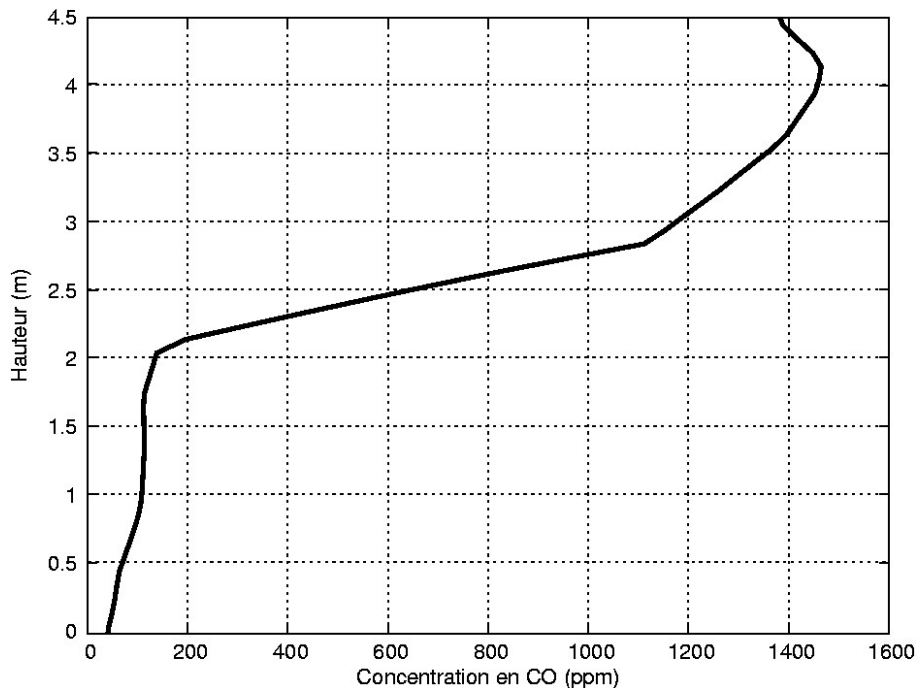


Figure 4 : Profil de concentration en CO calculée sur le plan médian du tunnel, 20 m en aval du PL C, à 17:54:25 soit 6 minutes après le début de l'incendie, avec les hypothèses 30 ou 60 MW

## 2.2 Phase de désenfumage (à partir de 17:57:01)

### 2.2.1 Courant d'air longitudinal et déplacement des fronts de fumée

Voir la figure 3, page 8.

Malgré la légère surestimation du courant d'air longitudinal au droit du foyer (3,5 m/s au lieu de 3), la vitesse du front calculée côté Italie devient nettement inférieure à celle indiquée par le graphe annexé au rapport provisoire du BEA-TT. Le courant d'air a pu augmenter la puissance de l'incendie, compensant l'effet de l'extraction des fumées qui aurait tendance à ralentir le front. Le graphe du BEA-TT a peut-être également été établi de façon moins détaillée que le relevé des résultats du calcul.

Côté France, la résorption de la nappe de retour est bien reproduite mais uniquement grâce à un artifice de modélisation : le domaine de calcul s'arrête presque exactement au point le plus éloigné atteint par la fumée dans la réalité. Lorsque le front revient vers le foyer, il est donc suivi par de l'air frais car la condition d'entrée est spécifiée ainsi. Remarquons que le phénomène de nappe de retour est assez sensible et que les modélisations numériques permettent rarement de retrouver la longueur de la nappe constatée dans l'expérience.

## 2.2.2 Températures

### *Températures subies par les équipements en plafond*

Le seul équipement important encore partiellement en fonction lorsque le désenfumage est activé est l'éclairage.

Même en présence d'un fort courant d'air qui dilue les gaz chauds, les températures autour du foyer restent élevées en plafond. Les 500°C sont dépassés uniquement dans une zone restreinte mais l'air est à plus de 200°C au voisinage du plafond sur environ 60 m en aval du PL A.

### *Températures subies par les usagers, les secours et les équipements en partie basse*

La température au vent du foyer est ramenée à la température ambiante par le courant d'air. Les flux rayonnés calculés sont supportables par les sapeurs-pompiers équipés à une vingtaine de mètres du feu.

En revanche, sous le vent du foyer, la température de l'air dépasse 100°C, voire 150°C à hauteur d'homme jusqu'au droit du PL C au moins à la fin de la simulation (24 minutes d'incendie). Les valeurs réelles sont certainement plus élevées car à cet instant, le PL B est probablement déjà en feu. Ces températures peuvent expliquer les dégâts observés sur les équipements (plots de jalonnement, carneaux de soufflage, niches, etc.)

### *Températures subies par les structures de génie civil*

Malgré le fort courant d'air, la dalle continue à s'échauffer progressivement. Toutefois, les 24 minutes de la simulation ne suffisent pas pour atteindre des températures très importantes dans le béton. Les valeurs maximales sont d'environ 600°C. La face supérieure de la dalle côté gaine d'air frais reste pratiquement à température ambiante. Les conditions décrites par les sapeurs-pompiers (semelles de chaussures qui fondent) ne peuvent donc être rencontrées qu'après un temps beaucoup plus long, du moins avec l'hypothèse de puissance 30 MW.

### *Températures dans la gaine d'air vicié*

La température maximale des fumées aspirées (dans la trappe 46) est de 400°C environ. Près de cette trappe, la voûte est soumise à des températures légèrement inférieures à 200°C. Partout ailleurs dans la gaine, la température n'excède guère 100°C. Ces valeurs sont insuffisantes pour expliquer les dégâts observés dans la gaine, notamment la fusion de la gaine de ventilation en aluminium du laboratoire.

On remarque un phénomène qui peut expliquer certains dégâts relevés en partie basse de la gaine : l'interaction du jet issu d'une trappe de désenfumage, du fort courant d'air dans la gaine et de la voûte renvoie localement les gaz les plus chauds en partie basse.

### 2.2.3 Visibilité

La visibilité se dégrade logiquement en aval du foyer lorsque la vitesse du courant d'air augmente. Au passage de chaque trappe de désenfumage, la concentration en suies diminue mais l'extraction reste insuffisante pour obtenir une visibilité satisfaisante, même à l'extrémité de la zone d'extraction. À la fin de la simulation, la visibilité est pratiquement uniforme sur la section. La distance de visibilité pour les objets réfléchissants est de l'ordre du mètre. La visibilité des objets lumineux devient rapidement sans objet puisque tous les équipements lumineux sont inopérants.

Le fort courant d'air au droit du foyer provoque donc une déstratification marquée des fumées, qui n'est pas compensée de façon suffisante par l'extraction. Il convient de rappeler ici le caractère particulièrement fumigène du chargement du PL A.

### 2.2.4 Toxicité

Le fort courant d'air homogénéise la concentration en CO, qui se stabilise à des valeurs de 400 à 600 ppm. La stratification en concentration a presque complètement disparu alors que la stratification thermique persiste.

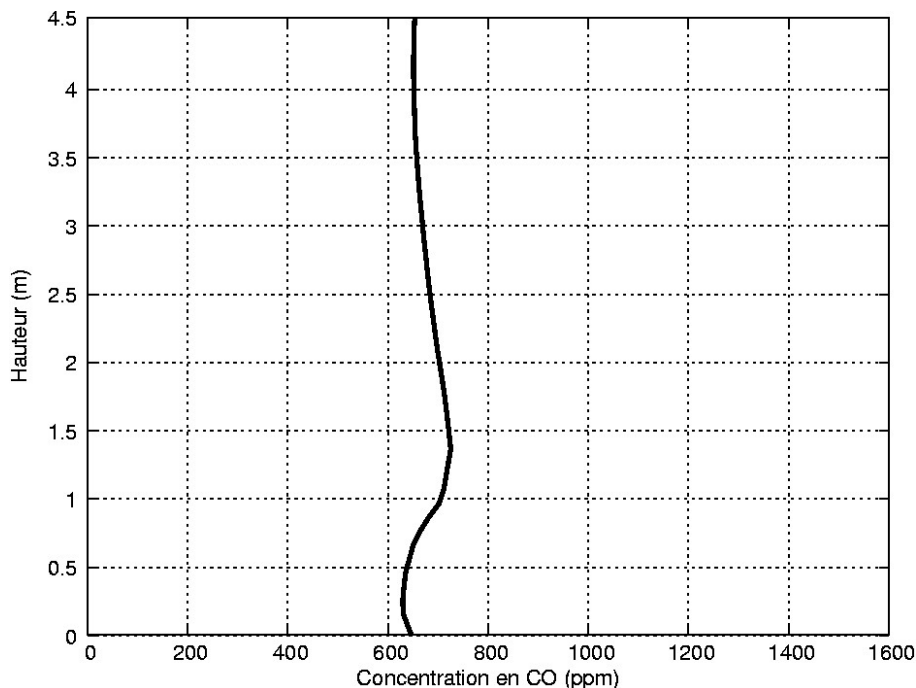


Figure 5 : Profil de concentration en CO calculée sur le plan médian du tunnel, au droit de l'abri 6, à 18:03:25 soit 15 minutes après le début de l'incendie, avec l'hypothèse 30 MW

La figure 5 donne le profil de concentration en CO au droit de l'abri 6 après 15 minutes d'incendie.

## 2.3 Inflammation des PL B, C et D

La température de l'air au voisinage immédiat du PL B dépasse les 200°C sur une zone assez étendue (principalement sur la face avant), avec des maxima entre 220 et 240°C. Cela semble encore insuffisant pour enflammer le poids lourd.

Les températures maximales sont atteintes juste avant la mise en route du désenfumage, ce qui semble logique : la puissance thermique du feu a atteint son maximum et le courant d'air ne dilue pas encore les gaz chauds.

## 2.4 Conclusion sur l'hypothèse 30 MW

Les températures calculées au droit du foyer dans l'hypothèse de puissance basse sont suffisantes pour mettre hors service les équipements. Cette simulation illustre bien la fragilité d'équipements tels que les câbles radio, l'éclairage ou les plots de jalonnement face à un incendie standard.

L'opacité est également suffisante pour gêner considérablement l'évacuation.

En revanche, les températures atteintes sur le PL B, et *a fortiori* sur les PL C et D, paraissent trop faibles pour expliquer leur inflammation. Mais ce sont surtout les valeurs de concentration en CO atteintes qui suggèrent que l'hypothèse de puissance 30 MW est inférieure à la réalité.

## 3 Phase 2 – Reconstitution de l'incendie : résultats obtenus avec l'hypothèse 60 MW

### 3.1 Phase initiale sans désenfumage (de 17:48:25 à 17:57:01)

Les 7 premières minutes de l'incendie se déroulent exactement de la même manière que précédemment.

Ensuite, jusqu'à la mise en route du désenfumage (soit pendant une minute et 45 secondes supplémentaires), la puissance continue d'augmenter à la même vitesse. La puissance atteinte lors de la mise en route du désenfumage est de 37 MW environ. Les conditions à la fin de la phase initiale sont qualitativement proches de celles trouvées avec l'hypothèse 30 MW. Nous relèverons donc dans la suite uniquement les différences significatives entre les deux scénarios sur la fin de la phase initiale.

#### 3.1.1 Courant d'air longitudinal et déplacement des fronts de fumée

Voir la figure 3, page 8.

Le front de fumée se déplace logiquement un peu plus rapidement que dans le calcul précédent. La différence de position du front est cependant faible en fin de phase initiale (une vingtaine de mètres).

La figure 6 montre l'évolution de la vitesse de l'air au droit du feu dans l'hypothèse 60 MW. On retrouve le phénomène de diminution de cette vitesse au début du sinistre, décrit au § 4.1.1.



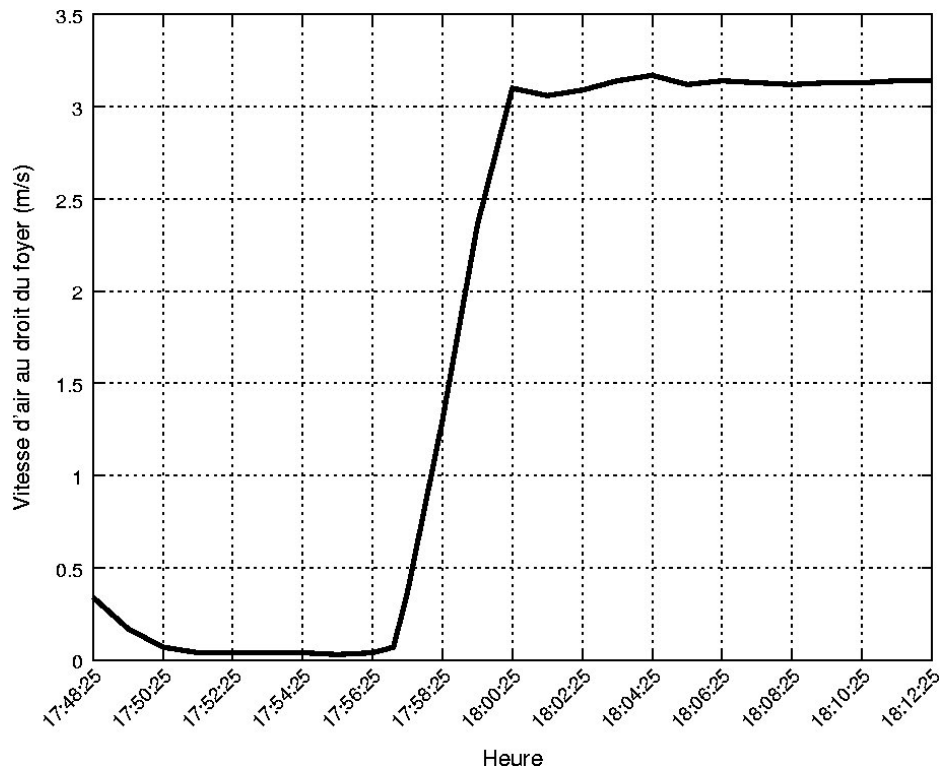


Figure 6 : Vitesse du courant d'air longitudinal dans une section située juste en amont du foyer, pour l'hypothèse de puissance 60 MW.

### 3.1.2 Températures

#### *Températures subies par les équipements en plafond*

À la mise en route du désenfumage, les températures dépassent les 800°C près du plafond au droit du foyer, avec des maxima supérieurs à 900°C. La zone où la température de l'air au voisinage du plafond excède 200°C s'étend sur une longueur de près de 150 m et se répartit des deux côtés du foyer.

#### *Températures subies par les usagers, les secours et les équipements en partie basse*

Les températures trouvées sont plus élevées que précédemment. On relève pour l'hypothèse 60 MW des températures de 80 à 100°C à hauteur d'homme jusqu'au droit du PL C. Plus loin, les conditions sont vivables. Les usagers non évacués n'ont donc pas été soumis à des températures dangereuses dans les premières minutes de leur fuite.

#### *Températures subies par les structures de génie civil*

La température maximale en sous-face de la dalle est supérieure à 800°C. Le piédroit le plus proche du PL A est localement chauffé à plus de 1100°C.

### 3.1.3 Visibilité

La dégradation des conditions de visibilité se poursuit à mesure que la puissance de l'incendie croît. Sur tout le trajet des victimes, la visibilité des objets réfléchissants serait de 3 à 4 m, mais la fumée est très dense en partie haute. Aucune lumière provenant de l'éclairage n'arrive donc à hauteur d'homme. Par ailleurs, la visibilité est trop faible pour distinguer, depuis un plot de jalonnement, le plot suivant. Il faut donc progresser à tâtons.

### 3.1.4 Toxicité

Comme pour l'hypothèse 30 MW, la concentration en CO à hauteur d'homme reste inférieure aux concentrations potentiellement mortelles, avec des valeurs de 400 à 600 ppm.

### 3.1.5 Conditions au voisinage du PL C

La phase cruciale pour les deux victimes se situant dans les 7 premières minutes, les résultats sont identiques à ceux obtenus avec l'hypothèse 30 MW.

## 3.2 Phase de désenfumage (à partir de 17:57:01)

Pour ce calcul, on a légèrement diminué la différence de pression appliquée entre les extrémités du domaine en fin de calcul, de manière à obtenir une valeur de courant d'air plus proche des 3 m/s trouvés par le calcul 1D. L'hypothèse 60 MW semblant *a priori* la plus proche de la puissance réelle, ce calcul devrait donner une représentation plausible des conditions pendant le sinistre.

### 3.2.1 Courant d'air longitudinal et déplacement des fronts de fumée

Voir la figure 3, page 8.

Le courant d'air longitudinal en régime de ventilation établi est de 3,1 m/s au droit du feu, ce qui correspond approximativement au résultat du calcul 1D. À l'extrémité de la zone d'extraction, le courant d'air moyen est orienté vers le foyer, avec une vitesse d'environ 0,3 m/s.

Le déplacement du front de fumée est très lent dans cette zone, alors qu'on sait que les fumées se sont propagées très loin dans l'ouvrage le 4 juin 2005. On peut donc supposer que le courant d'air calculé est ici inférieur (algébriquement) à la valeur réelle. Le calcul 1D aurait donc été trop optimiste. L'inversion du courant d'air dans la zone d'extraction n'a peut-être pas existé.

À cette distance du foyer, l'extraction et les pertes de chaleur ont réduit le débit de flottabilité, c'est-à-dire la « force motrice » de la nappe de fumée, à une valeur très faible. C'est pourquoi la propagation du front de fumée est très sensible aux variations du courant d'air longitudinal. L'inflammation des PL B, C et D peut également constituer un élément d'explication de la plus grande vitesse de propagation des fumées.

### 3.2.2 Températures

Durant la phase de désenfumage, toutes les températures sont à peu près stables dans le temps car la montée en puissance du feu compense l'augmentation de la vitesse du courant d'air, et donc la dilution des gaz chauds.

#### *Températures subies par les équipements en plafond*

Même avec un courant d'air de 3 m/s au droit du feu, les appareils d'éclairage encore en service subissent des températures d'air environnantes de plus de 800°C au droit du foyer et supérieures à 200°C sur environ 150 m à l'aval du PL A.

#### *Températures subies par les usagers, les secours et les équipements en partie basse*

La température est supérieure à 200°C à hauteur d'homme jusqu'au droit du PL C, soit sur plus de 130 m. Immédiatement en aval du PL A, la température monte à 400°C à hauteur d'homme. Les températures dues au seul incendie du PL A peuvent donc suffire à expliquer une grande partie des dégradations d'équipements observées.

Plus loin du foyer, la température a diminué mais la chaleur reste assez intense. La figure 7 donne l'évolution de la température à hauteur d'homme (1,60 m du sol environ) au droit de l'abri 6. Notons qu'une certaine stratification thermique persiste : une personne peut donc trouver des conditions thermiques plus favorables en se baissant.

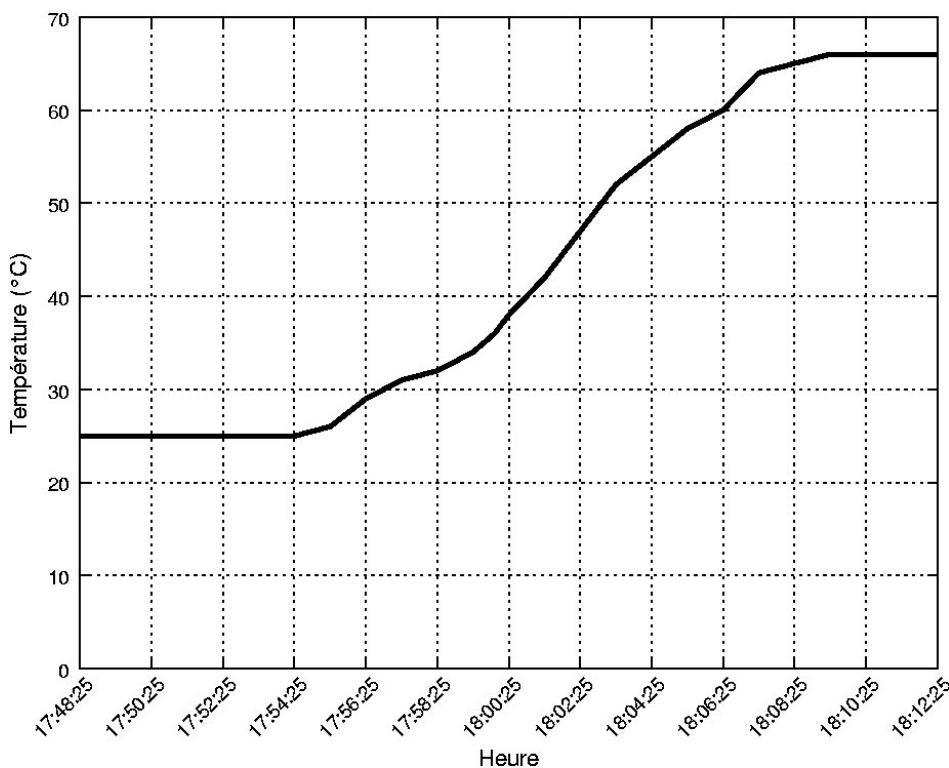


Figure 7 : Température à 1,60 m du sol au droit de l'abri 6.

### *Températures subies par les structures de génie civil*

L'augmentation de puissance compensant celle du courant d'air, les conditions de température en surface du béton ne changent guère par rapport à la phase initiale, avec des températures dépassant localement 800°C en sous-face de la dalle et 1000°C sur les piédroits. Les températures généralement estimées dans la dalle sur la zone du foyer sont plutôt de l'ordre de 500 à 600°C (pour une durée d'incendie nettement supérieure à celle de la simulation). Les sapeurs-pompiers ont également arrosé la dalle dès le début de leur intervention. Les valeurs trouvées semblent donc cohérentes avec l'état du béton.

### *Températures dans la gaine d'air vicié*

Avec l'hypothèse 60 MW, la température des gaz extraits par la trappe 46 atteint presque 700°C. La température maximale en voûte est de 300°C environ. Un peu plus loin dans la gaine (dans le sens de l'écoulement), la température s'homogénéise entre 150 et 200°C. La température dans le coin extérieur de la gaine dépasse localement 250°C. Là encore, ces températures paraissent faibles au regard des dégâts constatés. L'inflammation des PL B, C et D a pu faire augmenter significativement la température dans la gaine.

## **3.2.3 Visibilité**

La production de suies augmente proportionnellement à la puissance de l'incendie. En effet, la puissance thermique est proportionnelle à la masse de combustible brûlée par unité de temps. Une fraction de cette masse de combustible est transformée en suies ; cette fraction est approximativement constante sous des conditions de ventilation données. Ici, les conditions de ventilation ne changent pas entre les deux hypothèses de puissance. La production de suies est donc deux fois plus importante pour un feu de 60 MW que pour un feu de 30 MW.

La visibilité en aval du feu est donc fortement dégradée, avec des distances de visibilité des objets réfléchissants inférieures à 1 m dans les zones les plus opaques et 2 m au mieux. La partie haute du tunnel est occupée par de la fumée très dense et l'obscurité est certainement totale en partie basse, même lorsque l'éclairage est encore en fonction.

## **3.2.4 Toxicité**

La production de CO augmente elle aussi proportionnellement à la puissance du feu. De ce fait, on trouve des concentrations en CO à peu près doubles de celles observées dans l'hypothèse 30 MW. La valeur de 1000 ppm est généralement dépassée. Par rapport au scénario 30 MW, il subsiste un semblant de stratification mais la concentration au ras de la chaussée est déjà supérieure aux valeurs les plus élevées trouvées avec 30 MW. Les conditions ne permettent donc pas de progresser dans des conditions plus correctes en se baissant. Notons que dans le cas d'un écoulement parfaitement homogène, l'extraction n'a aucun effet sur la concentration en CO tant que le courant d'air n'est pas inversé pour provoquer une alimentation en air frais depuis une zone non enfumée.

Les concentrations en CO relevées correspondent à un temps avant perte de conscience de 30 minutes environ pour une exposition au monoxyde de carbone seul. Cependant,

l'inhalation simultanée de suies irritantes ainsi que d'autres gaz toxiques peut constituer un élément aggravant, de même que le stress. Il ne paraît donc pas aberrant qu'une concentration en CO voisine de 1000 ppm, jointe à l'effet d'autres substances nocives, ait été fatale aux deux chauffeurs en 15 à 30 minutes.

La figure 8 donne le profil de concentration au droit de l'abri 6 après 15 minutes d'incendie pour l'hypothèse 60 MW.

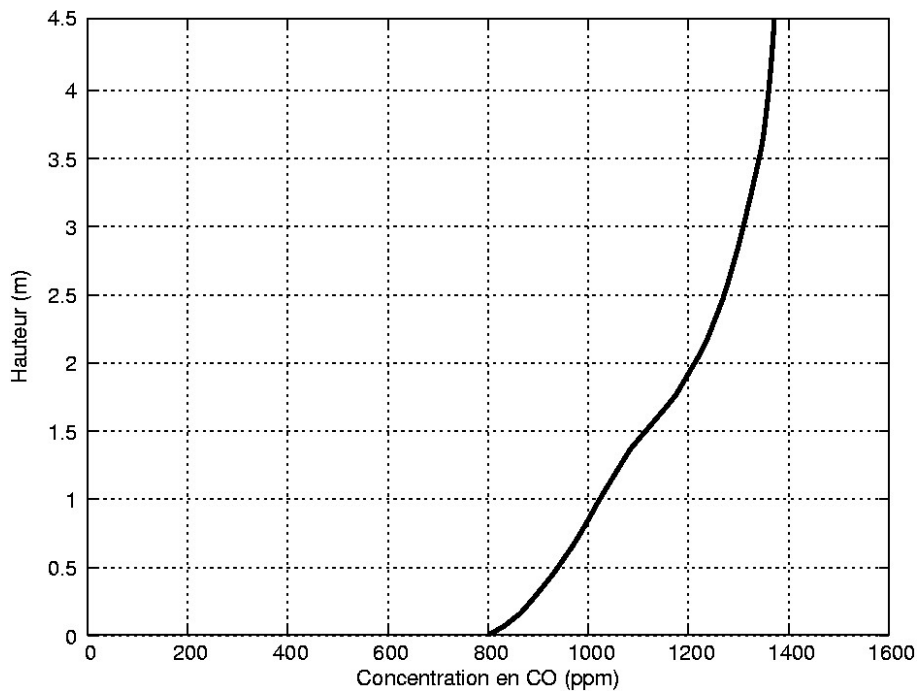


Figure 8 : Profil de concentration en CO calculée sur le plan médian du tunnel, au droit de l'abri 6, à 18:03:25 soit 15 minutes après le début de l'incendie, avec l'hypothèse 60 MW

La figure 9 montre l'évolution spatio-temporelle des zones à forte toxicité, en retenant les seuils de 300 ppm de CO (issu des recommandations de l'AIPCR) et de 1000 ppm (concentration pour laquelle le temps d'incapacitation est de l'ordre de 30 minutes).

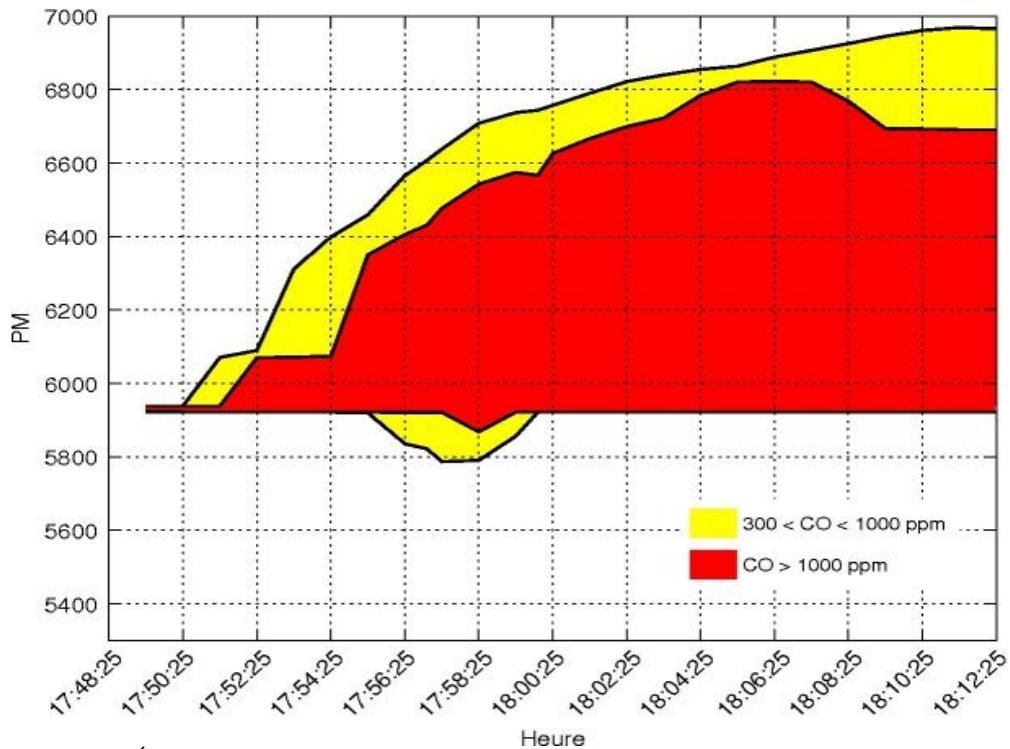


Figure 9 : Évolution spatio-temporelle des zones à forte concentration en CO pour la reconstitution de l'incendie du 4 juin 2005, hypothèse de puissance 60 MW.

### 3.3 Inflammation des PL B, C et D

La température de l'air au voisinage du PL B dépasse localement  $250^{\circ}\text{C}$  et ne diminue pas significativement quand le courant d'air augmente. Le PL B est également soumis, sur une surface importante, à un flux thermique rayonné supérieur à  $4 \text{ kW/m}^2$ . L'inflammation est donc plus probable que dans le cas précédent.

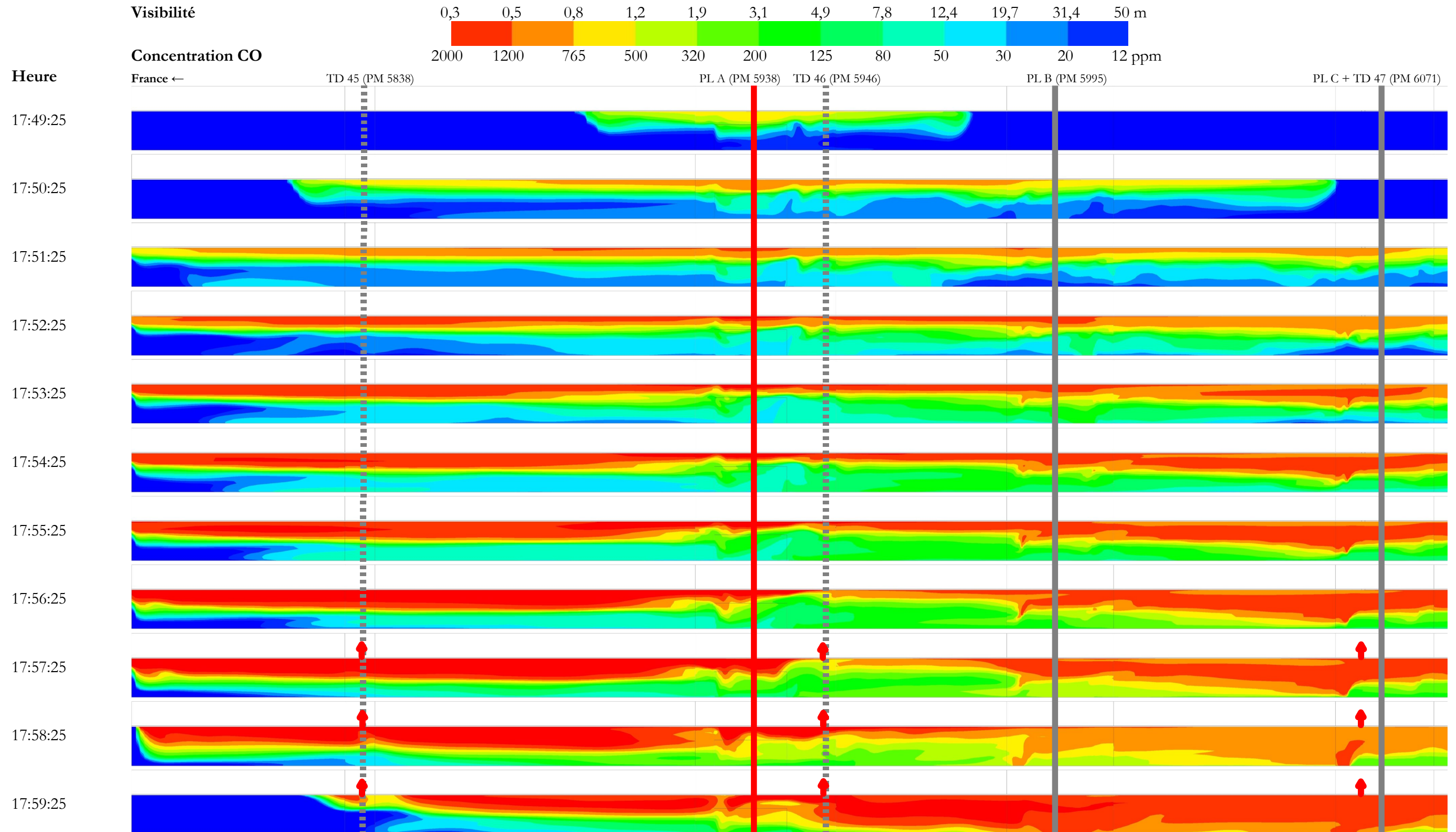
Une fois le PL B enflammé, on retrouve probablement des conditions similaires, voire plus sévères, aux alentours du PL C dont l'inflammation peut alors s'expliquer. Concernant le PL D, il est plus difficile de conclure mais des températures élevées ont également pu régner à cet endroit une fois les trois premiers PL en feu.

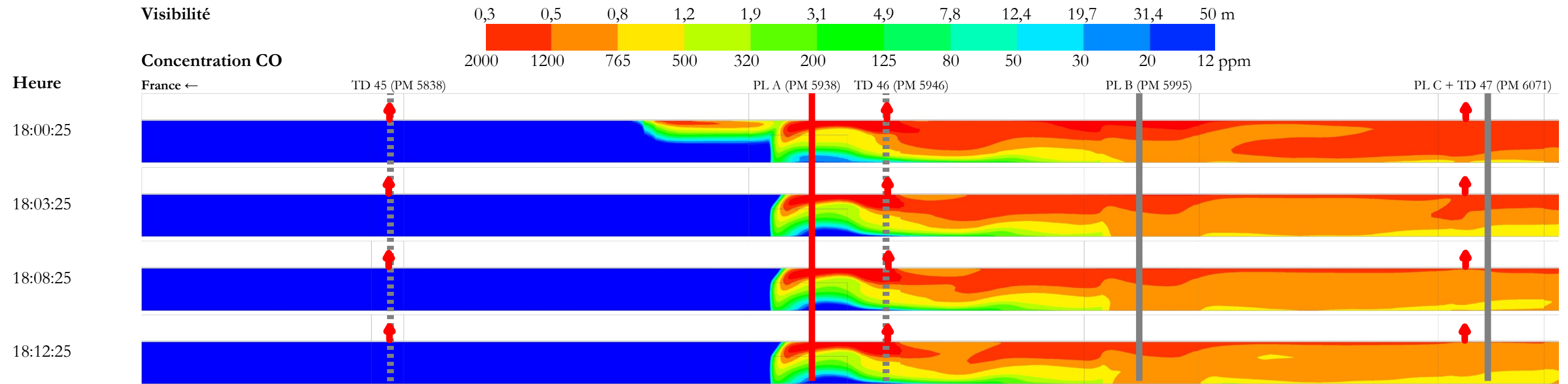
### 3.4 Résultats détaillés

On donne ici les champs de concentration en CO et de visibilité calculés dans l'hypothèse 60 MW qui, comme on le verra, est certainement la plus proche de la réalité du sinistre.



### 3.4.1 Distance de visibilité des objets réfléchissants et concentration en CO dans le plan médian du tunnel autour du foyer et jusqu'au PL C

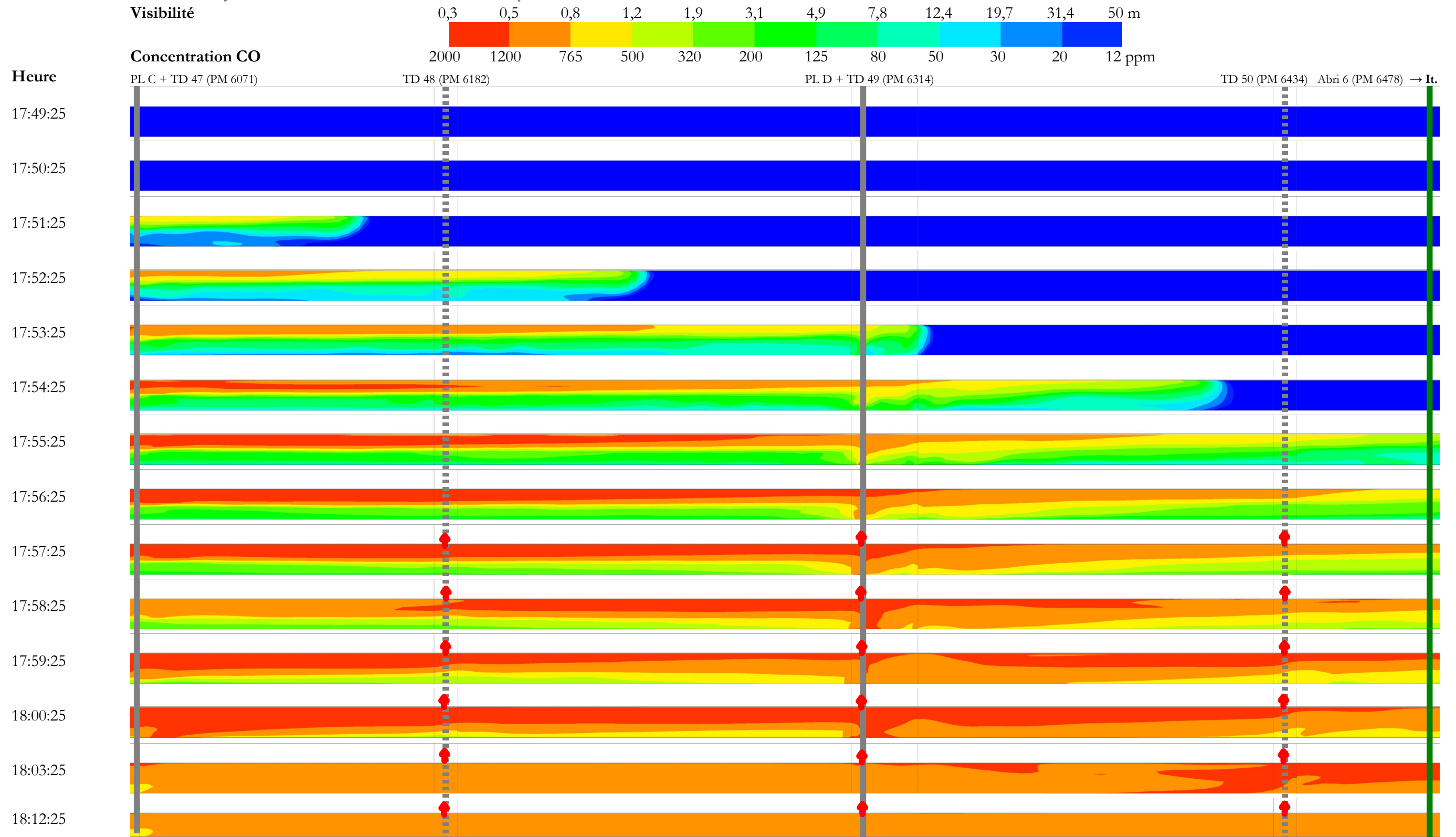




Aux alentours de 17:59, la résorption de la nappe de retour provoque le passage à l'aval du foyer d'un « bouchon » de fumée important constitué par les fumées qui se trouvaient en amont. Les conditions sont momentanément très dégradées.



3.4.2 Distance de visibilité des objets réfléchissants et concentration en CO dans le plan médian du tunnel entre le PL C et l'abri 6



### 3.5 Conclusion sur l'hypothèse 60 MW

Cette hypothèse est plus proche de la réalité que la précédente. Les températures atteintes sur le PL B semblent plus compatibles avec une inflammation de celui-ci, bien qu'encore un peu faibles. Les concentrations en CO calculées expliqueraient également mieux le décès des deux victimes.

La vitesse finale du courant d'air longitudinal a été réduite de 0,4 m/s environ par rapport à la simulation précédente de façon à mieux concorder avec les résultats des calculs monodimensionnels. La reconstitution de l'avancée du front de fumée côté italien s'en trouve dégradée, laissant penser que le courant d'air a effectivement été plus fort que ce que donne le calcul 1D. Toutefois, cette erreur n'est pas de nature à modifier les conclusions sur le calcul des températures ou des concentrations en suies ou CO.

## 4 Phase 2 – Reconstitution de l'incendie : résultats obtenus avec l'hypothèse 90 MW

### 4.1 Phase initiale sans désenfumage (de 17:48:25 à 17:57:01)

On rappelle que les deux premières minutes sont identiques pour les trois hypothèses de puissance.

#### 4.1.1 Courant d'air longitudinal et déplacement des fronts de fumée

Voir figure 3, page 8.

Comme précédemment, le courant d'air longitudinal reste faible au droit du foyer avant la mise en route du désenfumage.

La progression du front côté Italie est très similaire, durant cette phase, à celle trouvée pour les deux autres hypothèses de puissance. La vitesse du front est logiquement un peu plus élevée, mais cette différence ne permet pas à elle seule de conclure sur la pertinence relative des hypothèses 30 et 60 MW d'une part, et 90 MW d'autre part.

#### 4.1.2 Températures

##### *Températures subies par les équipements en plafond*

La température de l'air autour des équipements en plafond est plus élevée que dans les deux cas précédents, et ce dès la troisième minute d'incendie (plus de 600°C). Les 700°C sont atteints après 4 minutes. À l'instant où est constatée la défaillance du câble radio, les températures calculées sont supérieures à 1000°C au voisinage du foyer.

La mise hors service des équipements était déjà cohérente avec les résultats obtenus avec les hypothèses précédentes. L'hypothèse de puissance supérieure permet donc *a fortiori* de l'expliquer.

##### *Températures subies par les usagers, les secours et les équipements en partie basse*

À la mise en route du désenfumage, la température dépasse 200°C sur toute la section entre les PL A et B et ne descend guère sous les 100°C jusqu'au PL C. On rencontre des températures supérieures à 400°C à hauteur d'homme sur 50 m environ en aval du foyer. Plus loin du foyer, les températures restent vivables, au moins en se baissant (de l'ordre de 40 à 60°C). À l'amont du foyer (côté France), la stratification thermique est plus marquée mais les températures restent très élevées (de même que les flux rayonnés) sur une centaine de mètres.

### *Températures subies par les structures de génie civil*

On calcule en fin de phase initiale (17:57:01) une température maximale de la sous-face de la dalle supérieure à 1400°C. Sur toute la largeur du tunnel au droit du PL A, cette température est supérieure à 1000°C. La température de surface du piédroit le plus proche du PL A dépasse localement 1600°C, et 1400°C sur une zone de quelques mètres carrés. Ces valeurs paraissent élevées par rapport aux valeurs couramment utilisées (jusqu'à 1300°C), la différence étant liée à la modélisation du foyer et des transferts thermiques. Ces surestimations locales ne conduisent cependant pas à douter de la validité de la simulation dans le reste du domaine.

Concernant la validité de l'hypothèse 90 MW, il semble que la dalle n'ait pas été soumise à des sollicitations thermiques aussi fortes au cours de l'incendie. Cependant, cette phase de très fortes températures sans intervention des pompiers n'a duré que quelques minutes.

#### **4.1.3 Visibilité**

La visibilité est fortement dégradée dans le scénario 90 MW. À la mise en route du désenfumage, la visibilité en partie basse ne dépasse guère 1 à 2 m entre le PL C et l'abri 6. Elle est quasiment nulle entre le foyer et le PL C. Du côté France par rapport au PL A, la situation est un peu moins mauvaise, avec une visibilité de l'ordre de trois mètres vers la fin de la phase initiale. Pour les personnes se trouvant dans la fumée, la seule façon de progresser est donc souvent de suivre un piédroit à tâtons.

#### **4.1.4 Toxicité**

Durant la phase initiale, les concentrations en CO à hauteur d'homme restent comprises entre 500 et 1000 ppm entre le PL C et l'abri 6. De telles concentrations ne peuvent pas avoir de conséquences physiologiques graves à court terme. Cependant, la visibilité faible dénote une concentration en suies importante, lesquelles peuvent être très irritantes.

#### **4.1.5 Conditions au voisinage du PL C**

Comme dans les hypothèses précédentes, lorsque les deux conducteurs du PL C sortent de leur véhicule, la visibilité à l'extérieur est réduite du fait de la présence de suies et de la mise hors service partielle de l'éclairage et des plots de jalonnement. La concentration en CO est supérieure à celle calculée avec les autres hypothèses de puissance, notamment en partie haute, mais reste bien loin des seuils de toxicité mortelle à hauteur d'homme. La figure 10 illustre ces conditions.

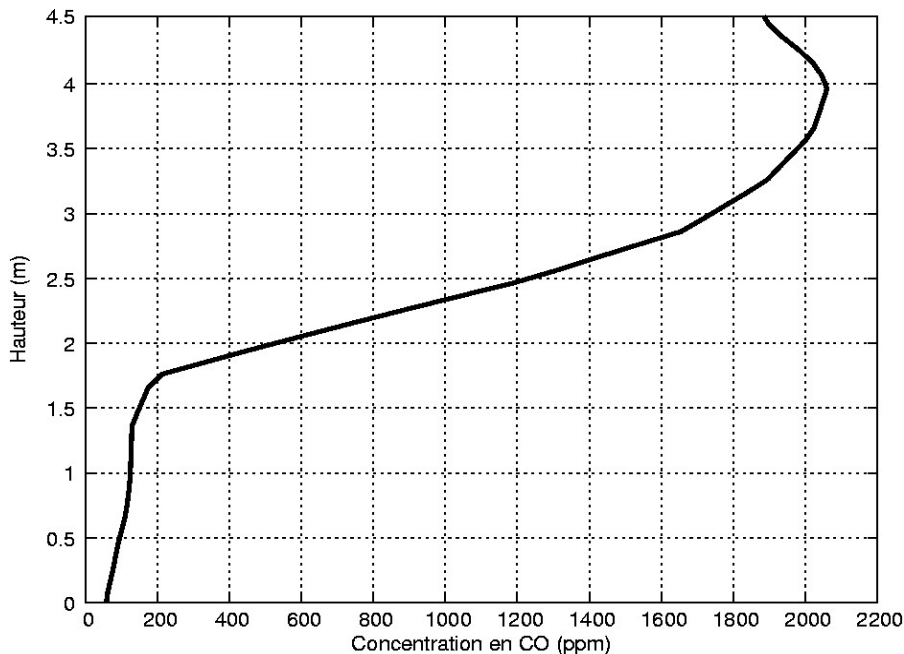


Figure 10: Profil de concentration en CO calculée sur le plan médian du tunnel, 20 m en aval du PL C, à 17:54:25 soit 6 minutes après le début de la simulation, avec l'hypothèse 90 MW

## 4.2 Phase de désenfumage (à partir de 17:57:01)

### 4.2.1 Courant d'air longitudinal et déplacement des fronts de fumée

La vitesse du courant d'air longitudinal au droit du foyer en régime établi est de 3,25 m/s, ce qui est proche du résultat du calcul 1D.

La progression du front est semblable qualitativement à celle trouvée dans l'hypothèse 60 MW, avec un ralentissement plus tardif. Ce comportement montre que sur une telle longueur de tunnel et avec des puissances fortes, la puissance n'influence qu'assez faiblement la progression du front. Les pertes de chaleur et le courant d'air longitudinal jouent certainement un rôle très important.

Contrairement à l'hypothèse 60 MW, le front de fumée sort du domaine de simulation au bout de 24 minutes. Cela justifie l'envahissement du tunnel par la fumée qui a été observé ensuite car après la dernière trappe ouverte, le courant d'air est de plus en plus favorable à la propagation du front de fumée à mesure que l'on s'approche de la tête italienne.

## 4.2.2 Températures

### *Températures subies par les équipements en plafond*

En régime de désenfumage établi, la température au voisinage du plafond dépasse 500°C jusqu'au PL B. Il est logique, dans ces conditions, que tout l'éclairage ait été mis hors service *in fine*.

### *Températures subies par les usagers, les secours et les équipements en partie basse*

La température de l'air en fin de simulation atteint des valeurs extrêmement élevées : les 150°C sont dépassés jusqu'au PL D. On atteint 110°C en moyenne au droit de l'abri 6. Entre les PL A et C, la température de l'air ne descend pratiquement pas sous les 300°C.

### *Températures subies par les structures de génie civil*

En fin de simulation, la température en sous-face de la dalle dépasse 1300°C sur quelques mètres carrés au-dessus du foyer. Les piédroits atteignent encore une fois des températures plus élevées, supérieures à 1400°C, certainement du fait de la modélisation du foyer et des transferts thermiques. La chaleur pénètre plus profondément dans la structure de la dalle qu'avec les autres hypothèses, mais la surface côté gaine d'air frais n'est pas encore chaude au bout des 24 minutes de simulation.

### *Températures dans la gaine d'air vicié*

La trappe la plus proche du PL A aspire de l'air à plus de 600°C. Une fois le mélange effectué, la température dépasse 200°C sur toute la section de la gaine, avec des zones à plus de 300°C. Si on considère que les PL B, C et D se sont ensuite enflammés et que les parois de la gaine se sont fortement échauffées pendant les quelques heures d'incendie, réduisant les pertes de chaleur, on peut estimer que ces résultats sont assez cohérents avec les dégâts observés en gaine.

## 4.2.3 Visibilité

On trouve des valeurs de visibilité inférieures au mètre, voire à 50 cm dans toute la portion d'ouvrage comprise entre le PL C et l'abri 6. Ce n'est qu'après la dernière trappe de désenfumage que la visibilité augmente significativement. L'éclairage étant pratiquement hors service, le résultat pour les usagers bloqués est pratiquement le même que dans l'hypothèse précédente.

## 4.2.4 Toxicité

On trouve, juste en aval du PL C, une concentration en CO pratiquement uniforme sur la section et proche de 2000 ppm. Purser [Purser 2002] donne un temps d'incapacitation de 15 minutes environ pour cette concentration, qui diminue peu jusqu'à l'abri 6 (1700 à 1800 ppm à hauteur d'homme à cet endroit). La concentration paraît donc élevée vis-à-vis

des chauffeurs du PL C, qui ont survécu plus longtemps, compte tenu de la présence d'autres substances dangereuses dans l'atmosphère, notamment les suies.

### 4.3 Inflammation des PL B, C et D

La température de l'air au voisinage du PL B dépasse 400°C sur une grande partie de la surface, avec des maxima supérieurs à 500°C, et ce dès le début de la phase de désenfumage. L'inflammation du PL B est donc tout à fait explicable dans cette hypothèse. Les températures autour du PL C, déjà élevées (200°C), le seraient encore plus une fois le PL B en feu et l'inflammation est donc probable.

### 4.4 Conclusion sur l'hypothèse 90 MW

Dans cette hypothèse, l'inflammation du PL B est tout à fait plausible, de même que le décès des deux chauffeurs du PL C par obstruction des voies respiratoires par les suies et intoxication au monoxyde de carbone. Cependant, on aurait également dû constater des brûlures importantes car les victimes auraient été soumises à des températures extrêmes pendant toute leur progression. De plus, les victimes auraient certainement été incapacités par les fumées avant d'atteindre le voisinage de l'abri 6. Les températures et concentrations calculées semblent donc élevées.

La puissance réelle a probablement été un peu inférieure, mais au moins de 70 à 75 MW. Il est impossible de donner une valeur précise, pour plusieurs raisons :

- La durée réelle de l'incendie du PL A a été d'environ 2h30, et seules 24 minutes ont été simulées. Certains dégâts aux équipements et au génie civil ont pu évoluer dans la suite de l'incendie.
- L'inflammation des PL B, puis C et D a pu modifier les conditions dans l'ouvrage de façon significative. Le courant d'air ayant toujours été orienté vers l'Italie, seul l'incendie du PL A peut expliquer les dégâts constatés à son voisinage. En revanche, les incendies « supplémentaires » ont pu contribuer à dégrader les conditions atmosphériques rencontrées par les victimes et les secours plus loin en aval.
- La modélisation du foyer et des transferts thermiques est trop incertaine à proximité du foyer pour pouvoir se fier entièrement aux températures calculées au voisinage du PL A, notamment en ce qui concerne le génie civil.
- Les conditions exactes de propagation d'un incendie ne sont pas vraiment connues. On peut dire que les températures calculées dans les hypothèses 30 et 60 MW paraissent un peu faibles pour expliquer l'inflammation des autres PL, et que celles trouvées dans l'hypothèse 90 MW sont tout à fait compatibles avec une propagation de l'incendie.
- Les pertes thermiques aux parois influencent très fortement les niveaux de température atteints. Ce paramètre a été ajusté le plus soigneusement possible mais l'évolution des transferts thermiques dans le temps, notamment, est incertaine.

Notons cependant que l'intervalle de valeurs de puissance trouvé est plus réduit que celui qui avait été donné par les calculs de reconstitution de l'incendie du Mont Blanc, effectués par le bureau d'études britannique Atkins pour le compte du Cetu. Nous profitons ici de données de validation plus nombreuses (relevés des dégâts, vidéos, données correctes sur la progression des victimes, etc.) ainsi que de données d'entrée plus précises (différence de pression entre les têtes, relevés GTC pour la ventilation, etc.).



## 5 Remarques générales

### 5.1 Stratification des fumées avant la mise en route du désenfumage

Au début de l'incendie, le courant d'air était faible dans la zone de l'incendie. La simulation sous-estime encore vraisemblablement ce courant d'air et les résultats en termes de stratification des fumées sont donc « optimistes ». Cependant, on note une dégradation importante de la visibilité en partie basse partout où les fumées sont présentes, même dans l'hypothèse 30 MW. La stratification thermique persiste mais les suies se diffusent un peu plus facilement que la température, suffisamment pour dégrader la visibilité.

La première cause de cette perte de visibilité est le caractère très fumigène du combustible. Le caoutchouc synthétique utilisé pour la fabrication des pneus est, parmi les matériaux courants, l'un des plus fumigènes. Outre l'opacité des fumées, il faut noter le caractère irritant des suies et les dégâts que peut causer leur inhalation sur les voies respiratoires. Avec une source de suies moins importante (feu de produits celluloseux par exemple), la dangerosité des fumées en phase initiale aurait été nettement moindre.

La seconde cause est la présence d'éléments perturbateurs dont il est rarement tenu compte dans les études d'incendies en tunnel. Il s'agit tout d'abord des poids lourds à l'arrêt dans le tunnel. Ils réduisent localement la section aérée de façon très significative, ce qui provoque une accélération de l'écoulement et donc un accroissement du mélange. Les variations de section génèrent également des turbulences supplémentaires. Tant que le sens du courant d'air moyen ne change pas, la déstratification locale engendrée par ces obstacles se retrouve dans toute la zone aval.

Un autre élément perturbateur est le soufflage d'air frais en bas de piédroit. Il crée un mouvement d'air autour de l'axe du tunnel qui tend à mélanger fumée et air frais, particulièrement lorsqu'on s'éloigne du foyer et que les différences de température, et donc la stabilité de l'écoulement stratifié, diminuent. L'écoulement transversal est en fait assez complexe et dépend de l'endroit considéré, notamment des températures dans la section ainsi que de la géométrie locale (interaction avec les PL présents dans le tunnel). L'écoulement type est décrit par la figure 11.

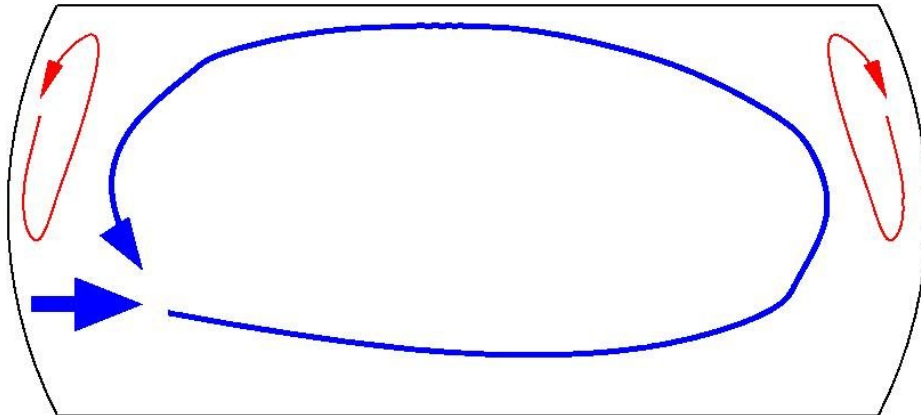


Figure 11: Écoulement type dans la section du tunnel. En bleu, l'écoulement principal généré par le soufflage d'air frais. En rouge, les circulations près des parois induites par les pertes de chaleur.

## 5.2 Efficacité du désenfumage

L'effet du désenfumage sur les concentrations en suies et CO est très peu sensible : en régime établi, les concentrations ne varient quasiment pas au passage d'une trappe de désenfumage.

Cela est dû à la déstratification quasi complète des fumées (vis-à-vis des suies et du CO). En effet, lorsqu'un écoulement contient une substance avec une concentration homogène, le soutirage d'une partie du fluide ne modifie pas la concentration. Dans le cas d'un tunnel, le débit massique de CO dans la section, par exemple, diminue au passage d'une trappe à cause de l'extraction, mais le débit total diminue dans les mêmes proportions et la concentration reste inchangée. La seule façon de modifier la concentration est d'injecter de l'air frais :

- soit en utilisant la ventilation de soufflage, qui n'est pas conçue dans ce but et ne permet pas de réduire significativement la concentration,
- soit en parvenant à inverser le sens du courant d'air longitudinal, ce qui crée un « appel » d'air frais en partie basse.

Lorsque l'écoulement est stratifié, on extrait principalement les fumées denses situées en plafond. La concentration en CO ou en suies du mélange extrait est donc supérieure à la concentration moyenne sur la section, qui diminue ainsi au passage de la trappe (figure 12).

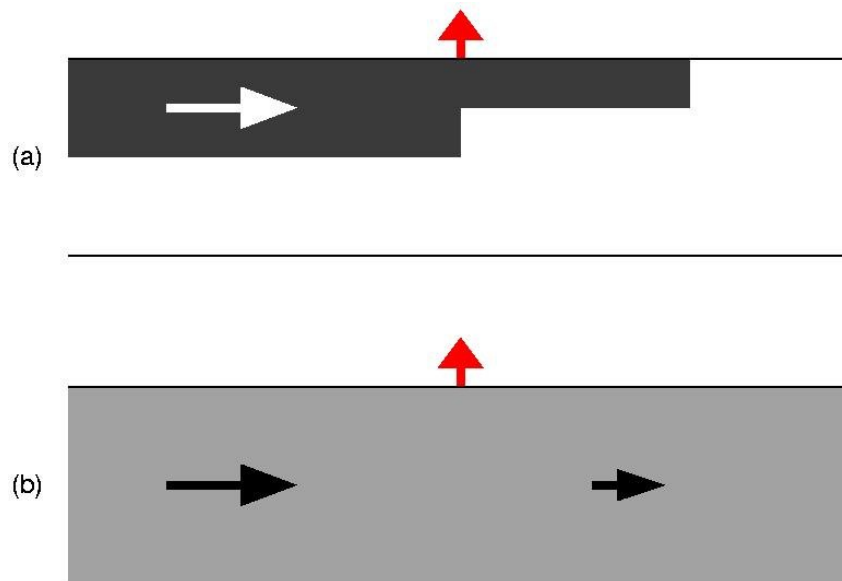


Figure 12 : Influence de l'extraction sur les concentrations en toxiques.  
a) Les fumées sont bien stratifiées ; la concentration moyenne sur la section diminue au passage de la trappe.  
b) L'écoulement est déstratifié : l'extraction ne modifie pas la concentration tant que le courant d'air ne s'inverse pas. La vitesse longitudinale est réduite.

### 5.3 Influence de l'inflammation des PL B, C et D sur les résultats

Les trois autres PL qui ont pris feu par la suite ont modifié les conditions de température, de visibilité et de toxicité.

Concernant les températures, les incendies des PL B, C et D expliquent les dégâts relevés sur les équipements et le génie civil à leur voisinage.

L'incendie du PL A a très certainement suffi à plonger une grande partie de la zone modélisée dans l'obscurité totale, du fait du dégagement de suies et de la mise hors service de l'éclairage. La remorque frigorifique du PL B a également pu dégager une grande quantité de suies. Le PL C, avec son chargement de ferraille, a dû contribuer de façon moindre à la dégradation des conditions. L'incendie du PL D, enfin, est nettement moins significatif car les sapeurs-pompiers ont réussi à circonscrire l'incendie à la cabine.

Compte tenu de la présence de suies irritantes et de l'état de stress probable des deux victimes, le décès des victimes :

- ne paraît pas vraiment explicable par le CO produit par le seul incendie du PL A dans l'hypothèse de puissance 30 MW,
- s'explique bien dans l'hypothèse 60 MW,
- aurait dû être plus rapide dans l'hypothèse 90 MW.

La combustion des PL B, voire C n'a pu que dégrader les conditions.

Il est cependant très hasardeux de chercher à quantifier ces effets. L'instant d'inflammation des différents PL est en effet très difficile à déterminer car il dépend de la puissance dégagée par la combustion des autres véhicules, des conditions de ventilation exactes, des matériaux constituant les véhicules, etc. Par la suite, le développement de l'incendie est également inconnu.

## 6 Conclusions des calculs de reconstitution

### 6.1 Conditions ayant régné pendant le sinistre

Les calculs de reconstitution se recourent généralement bien avec les observations sur le terrain. On parvient donc à expliquer la défaillance rapide de certains équipements (câble radio, une partie de l'éclairage) dans la zone du foyer. Dans tous les cas, les températures calculées concordent assez bien avec les dégâts observés sur le génie civil du tunnel (dégradations importantes au voisinage des PL en feu), sauf pour l'hypothèse 90 MW qui semble trop forte. En prenant des hypothèses de puissance élevées, on parvient à expliquer l'inflammation du PL B. Les conditions atmosphériques qui ont régné dans le tunnel sont probablement intermédiaires entre les résultats de la simulation avec foyer de 60 MW et de celle avec foyer de 90 MW : concentration en CO potentiellement mortelle en 15 à 30 minutes en tenant compte des effets conjugués d'autres gaz toxiques produits par le foyer et des suies irritantes, visibilité extrêmement réduite (de l'ordre du mètre au plus, conjuguée à la mise hors service totale ou partielle de l'éclairage et des plots de jalonnement), forte chaleur.

### 6.2 Puissance thermique

La puissance de l'incendie standard de 30 MW semble nettement insuffisante pour expliquer l'ensemble des conséquences observées de l'incendie du PL A, notamment l'inflammation des autres PL et le décès des victimes par intoxication au monoxyde de carbone.

L'hypothèse 60 MW donne certainement des résultats plus proches de la réalité : les concentrations en CO calculées, notamment, deviennent compatibles avec le décès des victimes compte tenu de la présence d'autres toxiques et de suies irritantes. Toutefois, les températures calculées au voisinage du PL B paraissent encore trop faibles pour expliquer son inflammation.

Dans l'hypothèse 90 MW, les conditions peuvent être qualifiées d'extrêmes, notamment en termes de température. Une température supérieure à 100°C jusqu'à l'abri 6 paraît surévaluée puisque les constatations effectuées sur les victimes ne font pas mention de brûlures importantes. Les sapeurs-pompiers ont également pu intervenir dans ces zones, et les victimes sont décédées après un temps qui paraît long dans de telles conditions.

Une valeur de puissance intermédiaire (70 à 80 MW) expliquerait certainement l'inflammation du PL B ainsi que le décès des victimes par asphyxie, tout en donnant des niveaux de température plus raisonnables.

L'hypothèse 60 MW et la montée en puissance correspondante, suffisamment représentatives, seront conservées pour les calculs de scénarios alternatifs afin de pouvoir comparer les résultats de la manière la plus pertinente possible.