

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 3
Étude de scénarios de désenfumage alternatifs**

Septembre 2007



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

Sommaire

1 Objectifs et démarche de la phase 3.....	4
1.1 Objectifs de la phase 3.....	4
1.2 Méthodologie de la phase 3.....	4
2 Scénario A : désenfumage symétrique.....	5
2.1 Description du scénario.....	5
2.2 Phase initiale sans désenfumage (jusqu'à 17:57:01).....	5
2.3 Phase de désenfumage (à partir de 17:57:01).....	6
2.4 Inflammation des PL B, C et D.....	9
2.5 Résultats détaillés.....	9
2.6 Conclusions sur le scénario A.....	12
2.7 Commentaires sur la stratification des fumées.....	12
3 Scénario B : désenfumage symétrique, détection rapide.....	13
3.1 Description du scénario.....	13
3.2 Phase initiale sans désenfumage (jusqu'à 17:50:25).....	13
3.3 Début du désenfumage (de 17:50:25 à 17:57:01).....	13
3.4 Phase de désenfumage (à partir de 17:57:01).....	15
3.5 Inflammation des PL B, C et D.....	17
3.6 Résultats détaillés.....	17
3.7 Conclusions sur le scénario B.....	20
4 Conclusions sur les scénarios alternatifs.....	21

1 Objectifs et démarche de la phase 3

1.1 Objectifs de la phase 3

La phase 3 a pour objectifs de déterminer dans quelle mesure les conditions auraient pu être améliorées ou dégradées si la gestion du sinistre avait été différente. Suite à des difficultés de localisation du sinistre, l'extraction a été effectuée essentiellement du côté italien par rapport au PL en feu, et non de façon symétrique. Cela a eu pour effet de générer un fort courant d'air dans le sens France-Italie au droit du foyer, et donc de déstratifier les fumées. Toute la section du tunnel s'est donc trouvée enfumée côté italien, avec des concentrations en CO potentiellement dangereuses. Les usagers non évacués ont été piégés dans la fumée et l'intervention des secours a été très difficile de ce côté. En revanche, du côté français, le courant d'air a permis aux sapeurs-pompiers d'attaquer efficacement le sinistre.

Cette phase de l'étude se concentrera essentiellement sur la modification des conditions atmosphériques du point de vue des usagers non évacués. Nous ne chercherons pas à tenir compte des variations de scénario qui auraient pu intervenir suite à la modification des conditions dans le tunnel : action des secours facilitée ou retardée, progression des usagers plus ou moins rapide, etc.

La phase 3 comporte trois scénarios de ventilation, sachant que la courbe de montée en puissance du feu sera celle utilisée dans le scénario « 60 MW » de la phase 2. La justification physique de cette courbe est moins évidente ici, mais il a été choisi de conserver un maximum de paramètres afin de faciliter les comparaisons.

- **Scénario A :** Le désenfumage est lancé sur les trappes 41 à 50, soit de manière symétrique par rapport au foyer, avec le même délai que le 4 juin 2005 (8 minutes et 36 secondes).
- **Scénario B :** Le désenfumage est lancé sur les trappes 41 à 50, deux minutes après le début de l'incendie. On peut supposer que c'est ce qui se serait produit si un système de détection automatique d'incident (DAI) avait été en service dans le tunnel au moment du sinistre.

1.2 Méthodologie de la phase 3

Le maillage a été modifié par rapport à la phase 2 car les trappes de désenfumage utilisées ne sont pas les mêmes. Le domaine de simulation s'étend ici entre les PM 5250 et 6518. La densité du maillage est similaire à celle de la phase 2, que ce soit dans les zones « stratégiques » (foyer, voisinage des trappes, etc.) ou en section courante. Le maillage comporte 1 247 713 éléments fluides et 101 358 éléments solides.

Toutes les modélisations sont identiques à celles de la phase 2 : foyer, turbulence, transfert de chaleur, etc., ainsi que les paramètres numériques. Comme dans la phase 2, les conditions aux limites ont été ajustées de manière à retrouver des vitesses de courant d'air longitudinal conformes aux résultats des calculs monodimensionnels.

2 Scénario A : désenfumage symétrique

2.1 Description du scénario

L'incendie est toujours supposé débiter à 17:48:25. Le désenfumage est effectivement lancé à 17:57:01 comme dans le scénario réel mais les trappes actives sont les trappes 41 à 50 (le PL A se trouve entre les trappes 45 et 46). Ce sont ces trappes qui auraient en principe été activées si le régulateur était parvenu à localiser précisément le sinistre.

Comme on a pu le constater par le calcul monodimensionnel, les conséquences de ce désenfumage symétrique sur le courant d'air longitudinal sont importantes. Une extraction centrée sur le foyer ne modifie en effet presque pas la valeur de la vitesse de l'air au droit du feu. En l'espèce, la vitesse initiale étant faible (dans le sens France-Italie), elle le demeure en présence d'extraction. Le 4 juin 2005, au contraire, la vitesse de l'air a atteint des valeurs supérieures à 3 m/s. On s'attend donc à une meilleure stratification des fumées dans ce scénario que dans le cas réel.

Des doutes subsistent cependant sur la capacité du système d'extraction à rétablir de bonnes conditions atmosphériques alors que la fumée a déjà envahi le tunnel pendant plus de 8 minutes, ainsi que sur le temps pendant lequel les fumées peuvent rester correctement stratifiées.

2.2 Phase initiale sans désenfumage (jusqu'à 17:57:01)

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

Comme dans les calculs de reconstitution, la vitesse du courant d'air diminue légèrement au début de la simulation en raison de la perte de charge créée par la présence des gaz chauds. Elle se stabilise ensuite entre 0,75 et 0,8 m/s au droit du foyer.

Le déplacement des fronts de fumée est similaire à celui observé dans la reconstitution pour cette phase initiale. Les limites du domaine de calcul permettent cependant de mieux observer la nappe de retour, qui dépasse légèrement la trappe 44. La longueur de la nappe est donc d'un peu plus de 200 m. Cette longueur est supérieure à la valeur réelle

2.2.2 Températures

Températures subies par les équipements en plafond

La température de l'air au voisinage du plafond à l'aplomb du PL A dépasse 200°C dès la première minute de l'incendie et 400°C après deux minutes. À la mise en route du désenfumage, la température de l'air près du plafond dépasse 500°C sur environ 40 m dans la zone du foyer. On retrouve donc les mêmes défaillances probables d'équipements que dans le sinistre du 4 juin 2005.

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

Malgré la faible vitesse du courant d'air, l'absence de désenfumage provoque une élévation importante de température au voisinage du feu, particulièrement du côté italien. Les PL B et C semblent créer un obstacle important à l'écoulement ; entre les PL A et C, la température dépasse 100°C à hauteur d'homme (plus de 160°C entre les PL A et B). Derrière le PL A, la température à hauteur d'homme chute brusquement à moins de 60°C ; les gaz chauds se trouvent uniquement en partie haute. Il existe donc une zone dangereuse en termes de température.

Températures subies par les structures de génie civil

La température maximale calculée en sous-face de la dalle à la fin de la phase initiale est de 820°C environ. Les effets déjà décrits dans le rapport de la phase 2 font qu'on calcule des températures supérieures à 900°C sur le piédroit le plus proche du PL A. Les mêmes mises en garde quant à l'interprétation de ces résultats s'appliquent.

2.2.3 Visibilité

Malgré le faible courant d'air, on remarque que la longueur du domaine considéré, l'absence de désenfumage ainsi que la forte production de suies conduisent à une dégradation très importante de la visibilité. Entre le PL C et l'abri 6, la visibilité en partie basse est au mieux de 3 à 4 mètres. La présence de fumée dense au plafond rend en outre l'éclairage inopérant ; des personnes se trouvant dans le tunnel seraient donc très probablement plongées dans l'obscurité totale.

2.2.4 Toxicité

L'ordre de grandeur des concentrations en CO dans toute la zone enfumée est de quelques centaines de ppm. Ces concentrations sont insuffisantes pour avoir à elles seules des conséquences graves sur la santé. En revanche, l'association du CO à d'autres toxiques et aux suies irritantes peut être dommageable.

2.2.5 Conditions au voisinage du PL C

L'aéraulique n'étant pas modifiée par rapport à la reconstitution (hypothèse 60 MW) dans cette phase initiale, on retrouve les mêmes conditions au voisinage du PL C. La visibilité est insuffisante pour progresser autrement qu'à tâtons (compte tenu des équipements hors service) mais la concentration en CO à hauteur d'homme reste inférieure aux seuils d'incapacitation.

2.3 Phase de désenfumage (à partir de 17:57:01)

2.3.1 Courant d'air longitudinal et déplacement des fronts de fumée

Le désenfumage symétrique ne modifie quasiment pas le courant d'air au droit du foyer, qui reste compris entre 0,75 et 0,8 m/s.

Il n'est pas possible d'interpréter directement le déplacement du front de fumée aval. En effet, la limite du domaine de calcul se situe un peu après l'abri 6. Le front de fumée sort donc du domaine. Le désenfumage permet d'inverser le courant d'air mais le fluide qui entre dans le domaine est toujours de l'air frais (il n'y a pas de « mémoire » de la fumée sortie du domaine). Il faut en fait un certain temps pour ramener vers le foyer la fumée qui se trouve entre le PM 6518 (limite du tronçon simulé) et le front aval réel.

Le calcul montre cependant qu'il est possible, avec un désenfumage symétrique, de ramener toutes les fumées à l'intérieur de la zone d'extraction (le front se stabilise autour de la trappe 50). On aurait donc probablement eu un tunnel libre de fumée entre l'abri 6 et la tête italienne au bout d'un temps de l'ordre de 20 minutes à compter du début de l'incendie. En supposant qu'elles se soient déplacées de la même manière depuis le PL C, les victimes auraient absorbé une dose de toxiques moindre puisqu'elles se seraient retrouvées dans une zone « propre » ; cela n'est toutefois pas suffisant pour affirmer qu'elles auraient survécu. Elles auraient également pu, le cas échéant, être secourues plus rapidement et peut-être même être évacuées vers la tête italienne au moyen d'un véhicule.

Une nappe de retour subsiste du fait du faible courant d'air. Sa longueur calculée est légèrement inférieure à 100 m.

2.3.2 Températures

Températures subies par les équipements en plafond

Contrairement à ce qui s'est produit le 4 juin 2005, les gaz chauds ne sont pas dilués par le courant d'air. À la fin de la simulation, les températures sont donc élevées, supérieures à 1000°C près du plafond jusqu'à une dizaine de mètres en aval du PL A (les valeurs sont à interpréter avec précaution en raison des limites de la modélisation du foyer). La température au voisinage du plafond dépasse les 500°C sur une cinquantaine de mètres. Ces températures sont synonymes de destruction de l'ensemble des équipements électriques en plafond dans la zone de l'incendie.

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

Si la température à hauteur d'homme dépasse les 200°C entre le foyer et le PL C, on note une brusque restratification thermique au passage de ce dernier. Ce phénomène est certainement lié à l'obstruction causée par les PL B et C. La température en partie basse du tunnel redevient alors supportable, avec des valeurs maximales aux alentours de 80°C assez près du PL C (zone où les victimes ne se trouvent plus au bout des 24 minutes simulées).

Du côté français, la stratification thermique est très bien marquée. La température à 1,60 m du sol dépasse 80°C lorsqu'on s'approche à moins de 30 m du foyer. Cette distance est à la limite de la portée minimale des lances à incendie définie par la normalisation et est donc certainement insuffisante pour réellement attaquer un feu. L'intervention des sapeurs-pompiers sera donc certainement perturbée par cette nappe de retour. On peut ajouter le risque de subir le passage de bouffées dont la température peut largement dépasser la valeur moyenne calculée par le code.

Températures subies par les structures de génie civil

La structure subit des températures supérieures à 1200°C au voisinage du PL A lorsque l'incendie est pleinement développé.

2.3.3 Visibilité

La visibilité reste très dégradée sur l'ensemble de la zone enfumée. Compte tenu des valeurs d'opacité, du phénomène d'occultation des luminaires et de la mise hors service des équipements par la chaleur, on peut considérer qu'une personne se trouvant dans la zone enfumée ne peut se déplacer qu'à tâtons. Cela vaut également pour la partie située côté France (nappe de retour). Le mélange entre fumée et air frais y est plus faible mais les concentrations en partie haute sont telles que la distance de visibilité ne dépasse pas 2 à 3 m. Il est donc à craindre que les sapeurs-pompiers éprouvent de grandes difficultés à repérer la position du foyer et que cela compromette l'efficacité de leur action. Compte tenu des difficultés rencontrées le 4 juin 2005, on peut considérer que les caméras thermiques des camions Titan auraient été inopérantes dans cette atmosphère.

2.3.4 Toxicité

Comme pour la visibilité, l'amélioration des conditions de toxicité par rapport à l'incendie du 4 juin 2005 est relativement limitée. Les concentrations sont de l'ordre de 800 à 1000 ppm à hauteur d'homme, avec cependant des gradients verticaux qui restent marqués (contrairement aux calculs de reconstitution qui montraient des profils plats). On peut incriminer le courant d'air plus faible et l'absence d'évacuation directe des toxiques du domaine considéré *via* le tunnel lui-même ; celle-ci n'est pas une solution en termes de sécurité mais permet de faire baisser les concentrations. À moins de respirer très près du sol, les deux chauffeurs vont donc absorber une dose de gaz toxiques assez comparable à celle du cas réel. La conclusion est la même en ce qui concerne les suies. Notons cependant que les valeurs de temps d'incapacitation données dans la littérature augmentent rapidement lorsque la concentration descend en-dessous de 1000 ppm.

L'examen de la toxicité côté France est sans objet puisque la nappe de retour gêne uniquement les sapeurs-pompiers, qui sont équipés d'appareils respiratoires.

La figure 1 montre l'évolution en espace et en temps de la concentration en CO à hauteur d'homme (zone comprise entre 1 m et 2,10 m de hauteur). Ces courbes sont issues directement de la simulation 3D et subissent donc l'effet de la troncature (non physique) du domaine peu après l'abri 6.

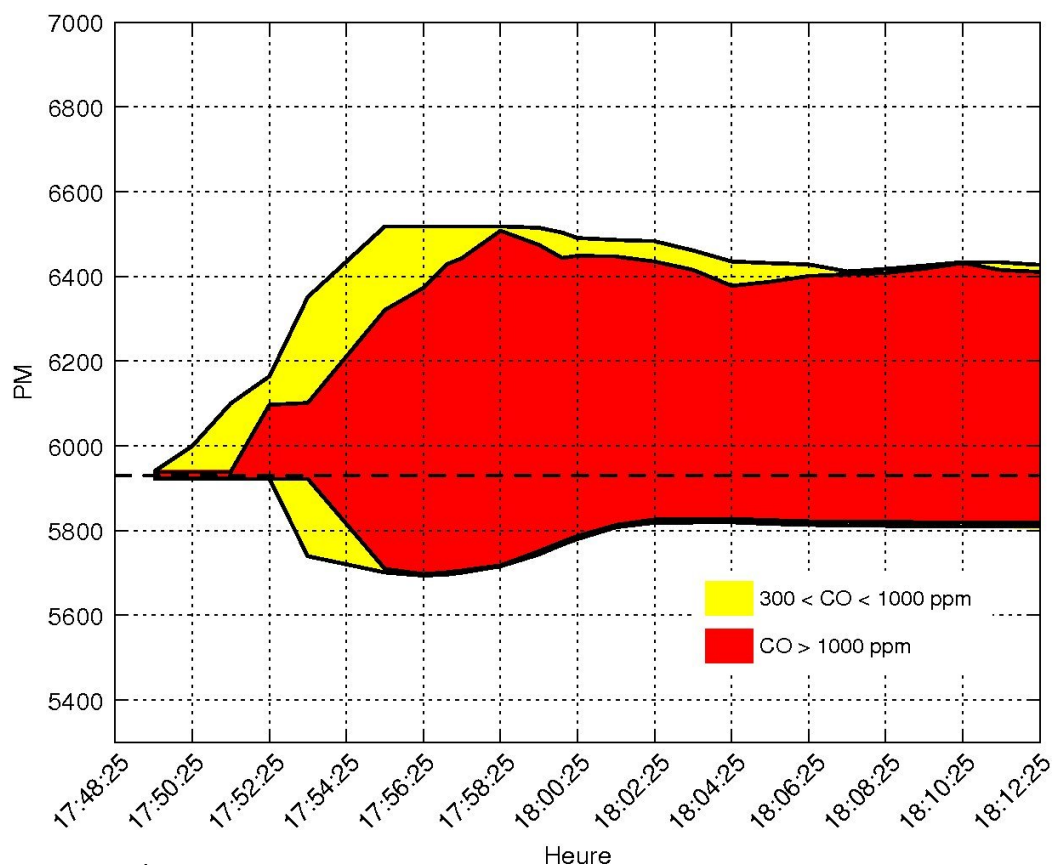


Figure 1 : Évolution de la concentration en CO à hauteur d'homme pour le scénario A.

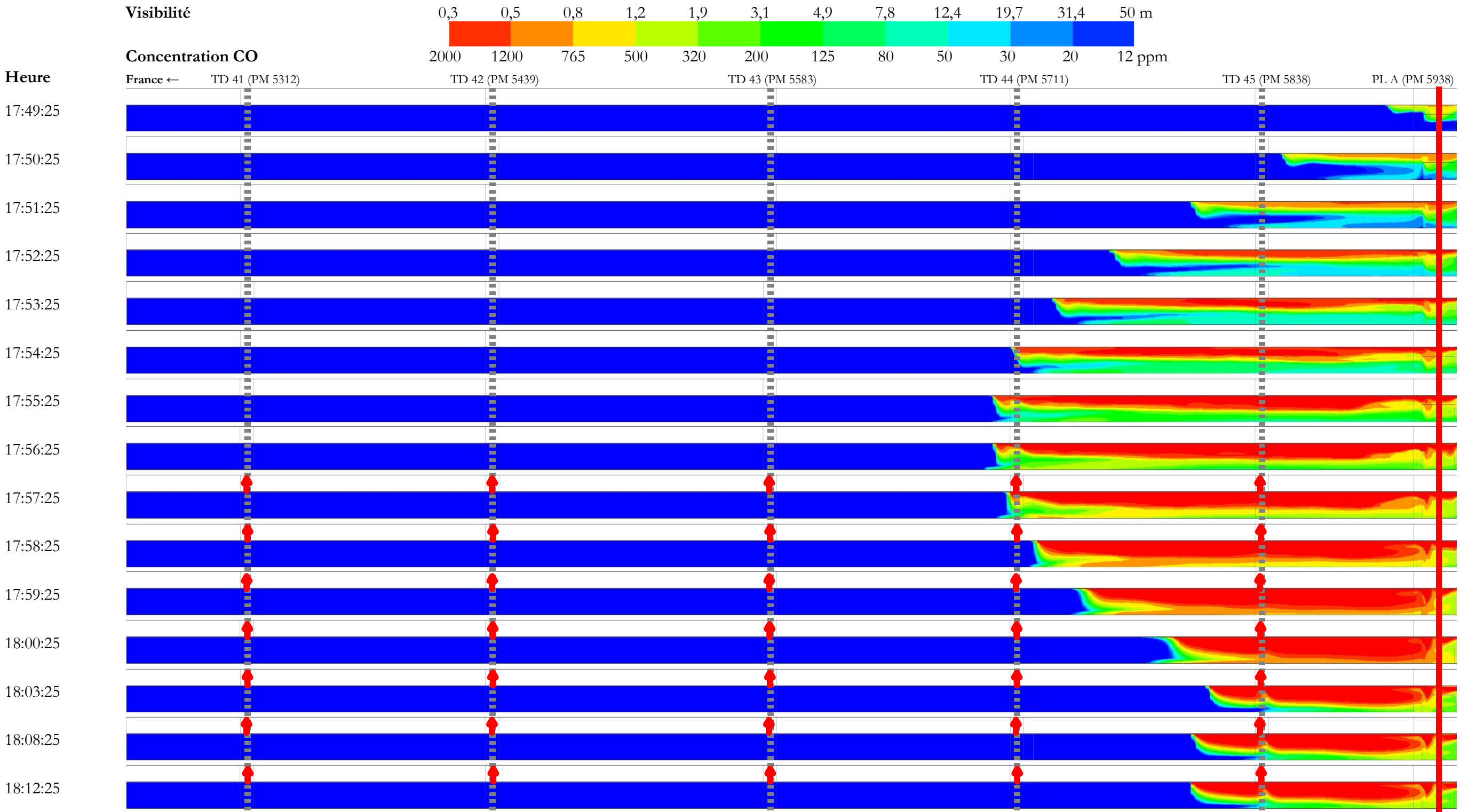
2.4 Inflammation des PL B, C et D

Les gaz au voisinage du PL B atteignent des températures supérieures à 400°C, notamment vers le haut de la cabine. Cela peut provoquer, comme le 4 juin 2005, l'inflammation de ce véhicule, puis éventuellement du PL C en fonction de la puissance de ce second foyer, etc. Le désenfumage symétrique n'améliore donc pas la situation de ce point de vue, ce qui était prévisible puisque le courant d'air faible dilue moins les gaz chauds et que les poids lourds ont une hauteur proche du gabarit de l'ouvrage, leurs parties supérieures atteignant les couches de gaz les plus chaudes.

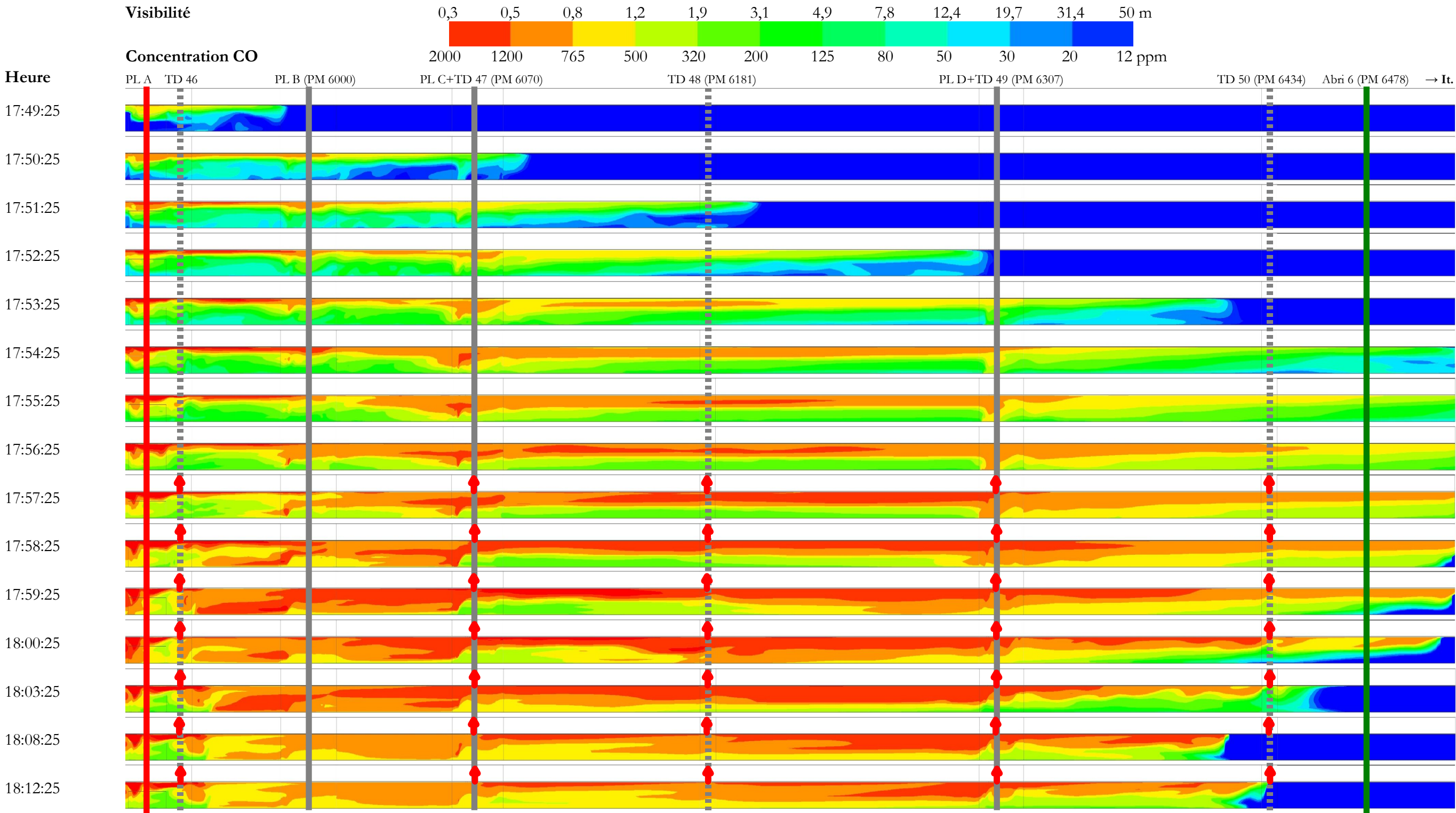
2.5 Résultats détaillés

On donne ci-dessous les champs de concentration en CO et de distance de visibilité des objets réfléchissants, relevés sur le plan médian du tunnel.

2.5.1 Distance de visibilité et concentration en CO sur le plan médian côté France par rapport au PL A



2.5.2 Distance de visibilité et concentration en CO sur le plan médian côté Italie par rapport au PL A



2.6 Conclusions sur le scénario A

La modification du courant d'air au droit du foyer a des conséquences à la fois favorables et défavorables sur la maîtrise de l'événement.

Premièrement, la nette convergence des courants d'air vers le foyer permet d'arrêter le front de fumée entre le foyer et l'abri 6. Si on suppose que les victimes progressent de la même manière que dans le cas réel, elles ont une chance de sortir de la zone enfumée avant que l'intoxication ne soit trop sérieuse. En outre, le passage est dégagé pour les services de secours qui peuvent porter assistance aux victimes dans un délai beaucoup plus court, voire le cas échéant les évacuer à l'aide d'un de leurs véhicules.

Cependant, les concentrations en gaz toxiques et en suies restant très significatives, la survie des deux chauffeurs du PL C n'est pas assurée. Les conditions de visibilité ne sont pas meilleures dans le sens où la seule manière de se déplacer dans la zone enfumée est toujours le tâtonnement. La persistance d'une nappe de retour très chaude et concentrée en suies est de nature à gêner significativement l'intervention des sapeurs-pompiers côté France.

En résumé, par rapport à la reconstitution avec l'hypothèse de puissance 60 MW, ce scénario augmente les chances de survie des deux chauffeurs du PL C, sans qu'il soit possible d'être plus affirmatif sur l'issue de l'événement. En revanche, elle dégrade les conditions d'attaque du feu par les sapeurs-pompiers.

2.7 Commentaires sur la stratification des fumées

Au vu de la valeur du courant d'air au droit du foyer, on aurait pu s'attendre à observer des fumées stratifiées. En fait, on peut effectivement parler d'*écoulement stratifié* car les gradients verticaux des différentes variables sont bien marqués. Toutefois, la puissance importante du foyer, son très fort pouvoir fumigène et les fortes concentrations en toxiques et en suies qui en résultent en partie haute suffisent, *via* un phénomène de diffusion assez limité, à créer des conditions très dégradées en partie basse. On ne peut donc plus parler de « fumées stratifiées » au sens usuel, c'est-à-dire de fumées sous lesquelles subsiste une couche d'air peu pollué, non toxique et suffisamment transparent pour progresser « à vue ».

D'autres phénomènes encore mal étudiés contribuent certainement à la dégradation des conditions. On peut citer l'encombrement du tunnel par les PL B, C et D, qui forment visiblement des obstacles importants devant lesquels la fumée s'accumule (voir les champs de visibilité), ou encore le soufflage d'air frais qui forme les « langues » de fumée en partie basse à proximité des fronts mais n'a aucun effet notable sur le champ de température.

3 Scénario B : désenfumage symétrique, détection rapide

3.1 Description du scénario

L'incendie est toujours supposé débiter à 17:48:25. On suppose que la détection et la localisation du sinistre, ainsi que la mise en route du désenfumage, prennent en tout deux minutes. Cela est réalisable si un système de détection automatique d'incident (DAI) est installé dans l'ouvrage. Un tel système analyse en permanence les images filmées par les caméras de surveillance du tunnel. Lorsqu'une anomalie est détectée, par exemple l'arrêt d'un véhicule ou la présence d'un piéton dans l'ouvrage, une alarme prévient le régulateur et les images correspondantes sont automatiquement affichées sur un moniteur dédié. En l'espèce, les vidéos montrent que lorsque le PL A s'est arrêté, il avait déjà partiellement enfumé le tunnel et les flammes ont été rapidement très visibles sur le côté droit de la cabine. L'affichage automatique de cette image n'aurait laissé aucun doute quant à la nature de l'événement et aurait conduit le régulateur à activer immédiatement la procédure d'incendie : fermeture du tunnel et lancement du désenfumage. L'installation du système de DAI au tunnel du Fréjus était quasiment achevée à la date du sinistre. Le système aurait dû entrer en fonction dans les jours ou les semaines suivants.

Comme dans le scénario A, les trappes activées pour le désenfumage sont les trappes 41 à 50. En effet, un système de DAI permet en principe une localisation précise de l'événement.

Concernant la simulation proprement dite, la seule différence avec le scénario A réside dans le délai d'activation du désenfumage. Les conséquences de cette activation plus rapide du système devraient être favorables. En effet, à la mise en route du désenfumage, la puissance de l'incendie est moindre et l'étendue de la zone enfumée est réduite.

3.2 Phase initiale sans désenfumage (jusqu'à 17:50:25)

Pendant les deux premières minutes de l'incendie, le front de fumée côté Italie atteint le PL C. Nous avons déjà noté à l'occasion des calculs de reconstitution que cette vitesse de propagation était surestimée en raison de la croissance trop rapide de la puissance du feu par rapport à la réalité. À cet instant, toutefois, la visibilité reste compatible avec l'auto-évacuation et les concentrations en toxiques sont loin des seuils de danger.

3.3 Début du désenfumage (de 17:50:25 à 17:57:01)

On s'attache dans cette section à décrire les modifications apportées par le déclenchement du désenfumage.

3.3.1 Courant d'air longitudinal et déplacement des fronts de fumée

Le courant d'air au droit du foyer prend des valeurs très similaires à celles du scénario A, soit entre 0,5 et 0,8 m/s.

Par rapport au scénario A, le déclenchement plus rapide du désenfumage permet de générer des courants d'air convergeant vers le foyer dans un délai nettement plus court. Ainsi, le front de fumée du côté italien est ralenti et ne dépasse guère le PL D dans cette phase. À une vitesse moyenne de 2 km/h (très ralentie par les mauvaises conditions), il faut moins de 8 minutes à un piéton pour parcourir la distance séparant le PL C de la zone libre de fumée, cette distance étant inférieure à 250 m.

La figure 2 montre l'évolution des fronts de fumée pour les deux scénarios alternatifs. Le scénario A est reconstitué à partir de calculs monodimensionnels (voir fascicule 4) pour s'affranchir de l'effet de la troncature du domaine après l'abri 6.

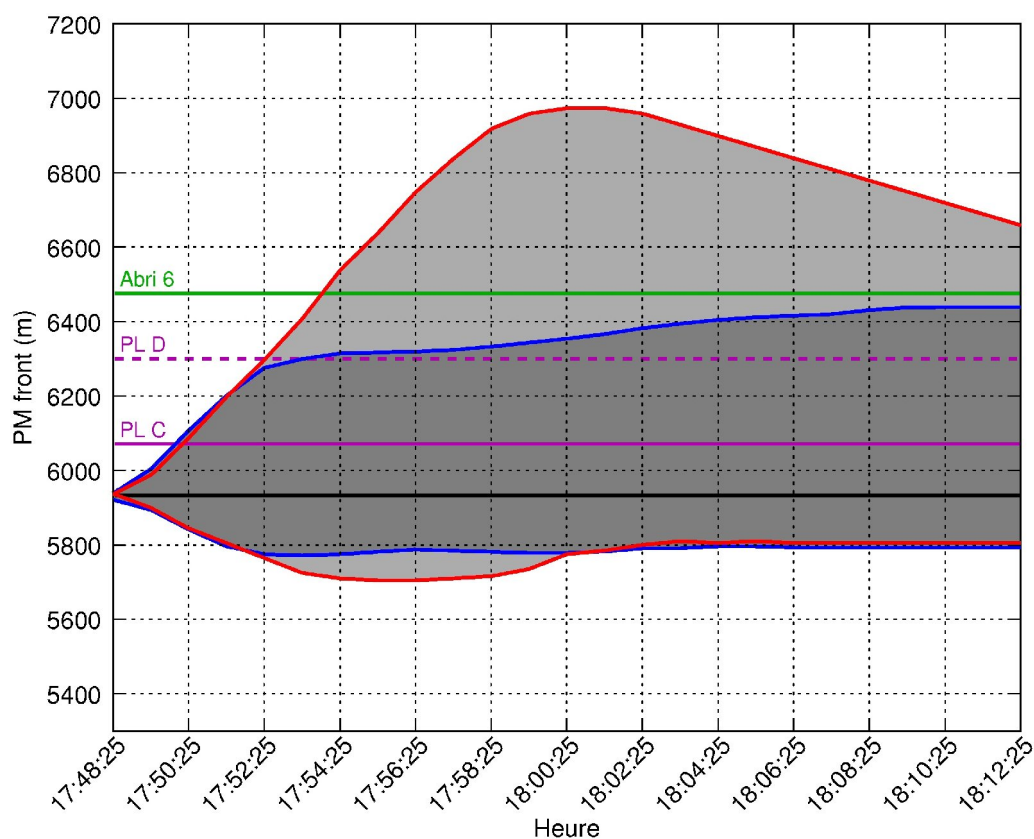


Figure 2 : Déplacement des fronts de fumée pour les scénarios alternatifs A (gris clair) et B (gris foncé).

3.3.2 Températures

Températures subies par les équipements en plafond

Comme dans les scénarios précédents, les températures deviennent très rapidement suffisantes pour mettre hors service des équipements sensibles comme le câble radio, puis d'autres plus résistants comme l'éclairage. À la fin de la période considérée, la température dépasse 500°C au voisinage du plafond sur quelques dizaines de mètres autour du foyer.

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

À la fin de la période considérée, la température est déjà insupportable à hauteur d'homme (plus de 100°C) entre les PL A et B. Le PL B constitue un obstacle important à l'écoulement et la température baisse subitement à son passage (ou plutôt, l'écoulement devient mieux stratifié). Du côté France, la température en partie basse reste compatible avec l'intervention des secours (70 à 80°C au maximum).

Concernant les équipements, la température très élevée à toute hauteur au voisinage du PL A peut causer des destructions d'équipements.

Températures subies par les structures de génie civil

Comme précédemment, les températures de surface au voisinage du foyer atteignent des valeurs de 800 à 900°C, valeurs qui restent sujettes à caution en raison de la difficulté de modéliser le foyer de façon réaliste.

3.3.3 Visibilité

La visibilité reste très dégradée par la forte production de suies du foyer. Les valeurs d'opacité sont moins fortes mais suffisent à obscurcir totalement l'atmosphère et à obliger une personne se trouvant dans la fumée à se déplacer à tâtons.

3.3.4 Toxicité

Les valeurs de concentrations en CO à hauteur d'homme restent modérées dans cette phase, ne dépassant pas les 200 ppm. Si on prend uniquement ce facteur en considération, le temps de survie est nettement supérieur au temps nécessaire pour quitter la zone enfumée. Le problème de la dangerosité des suies reste posé mais la toxicité de l'atmosphère est nettement réduite par rapport au scénario réel.

3.3.5 Conditions au voisinage du PL C

On retrouve, au moment supposé où les chauffeurs sortent de leur véhicule, des conditions qualitativement similaires à celles des scénarios précédents : l'atmosphère est très obscurcie mais sa toxicité est en-deçà des seuils de danger.

3.4 Phase de désenfumage (à partir de 17:57:01)

3.4.1 Courant d'air longitudinal et déplacement des fronts de fumée

Les courants d'air convergents continuent de freiner la progression des fronts. Le front côté Italie ne se déplace que très lentement, à une vitesse inférieure de l'ordre de 0,2 à 0,3 m/s, soit beaucoup plus lentement qu'un piéton. Côté France, le front se stabilise et oscille autour du PM 5800. Si la stabilisation du front est parfaitement logique, sa position ne peut être considérée comme certaine en raison de la grande sensibilité du phénomène de

backlayering (propagation de front à contre-courant) vis-à-vis de certains paramètres difficiles à ajuster comme les pertes de chaleur aux parois.

3.4.2 Températures

Températures subies par les équipements en plafond

En fin de simulation, les températures au voisinage du plafond dépassent 500°C sur une cinquantaine de mètres autour du PL A.

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

La température à hauteur d'homme dépasse 200°C entre le PL A et le PL C. En aval du PL C, les valeurs deviennent beaucoup plus raisonnables et sont parfaitement supportables à partir de 100 m au-delà du PL C. Du côté France, le gradient thermique est très marqué et il subsiste une couche d'air pratiquement à température ambiante.

3.4.3 Visibilité

La visibilité est de l'ordre du mètre dans toute la zone enfumée. Compte tenu des pertes d'équipements et de l'occultation des luminaires, la progression n'est possible qu'à tâtons.

3.4.4 Toxicité

À la fin de la simulation, les concentrations en CO à hauteur d'homme deviennent élevées et dépassent les seuils de danger. On trouve un profil de forme triangulaire avec des valeurs de concentration pouvant aller jusqu'à 1000 ppm à hauteur d'homme. Un usager bloqué dans la fumée subirait donc probablement une sérieuse intoxication. Au ras du sol, la concentration reste cependant plus faible (environ 500 ppm), contrairement aux scénarios de reconstitution.

La figure 3 donne l'évolution en espace et en temps des concentrations en CO à hauteur d'homme. On remarque notamment que lorsque les fronts de fumée sont bloqués par le courant d'air, comme ici en fin de simulation, les fumées sont fortement concentrées et il n'existe pratiquement pas de « zone de transition » avec l'air frais.

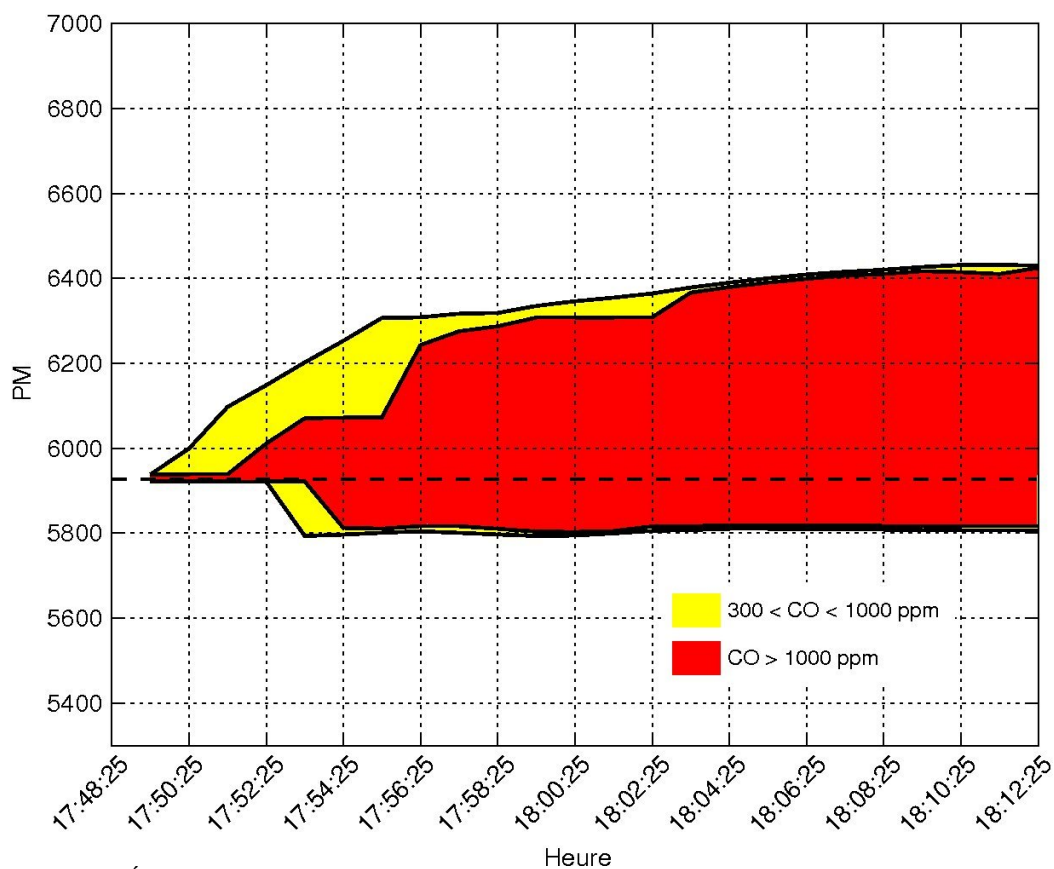


Figure 3: Évolution des concentrations en CO à hauteur d'homme pour le scénario B.

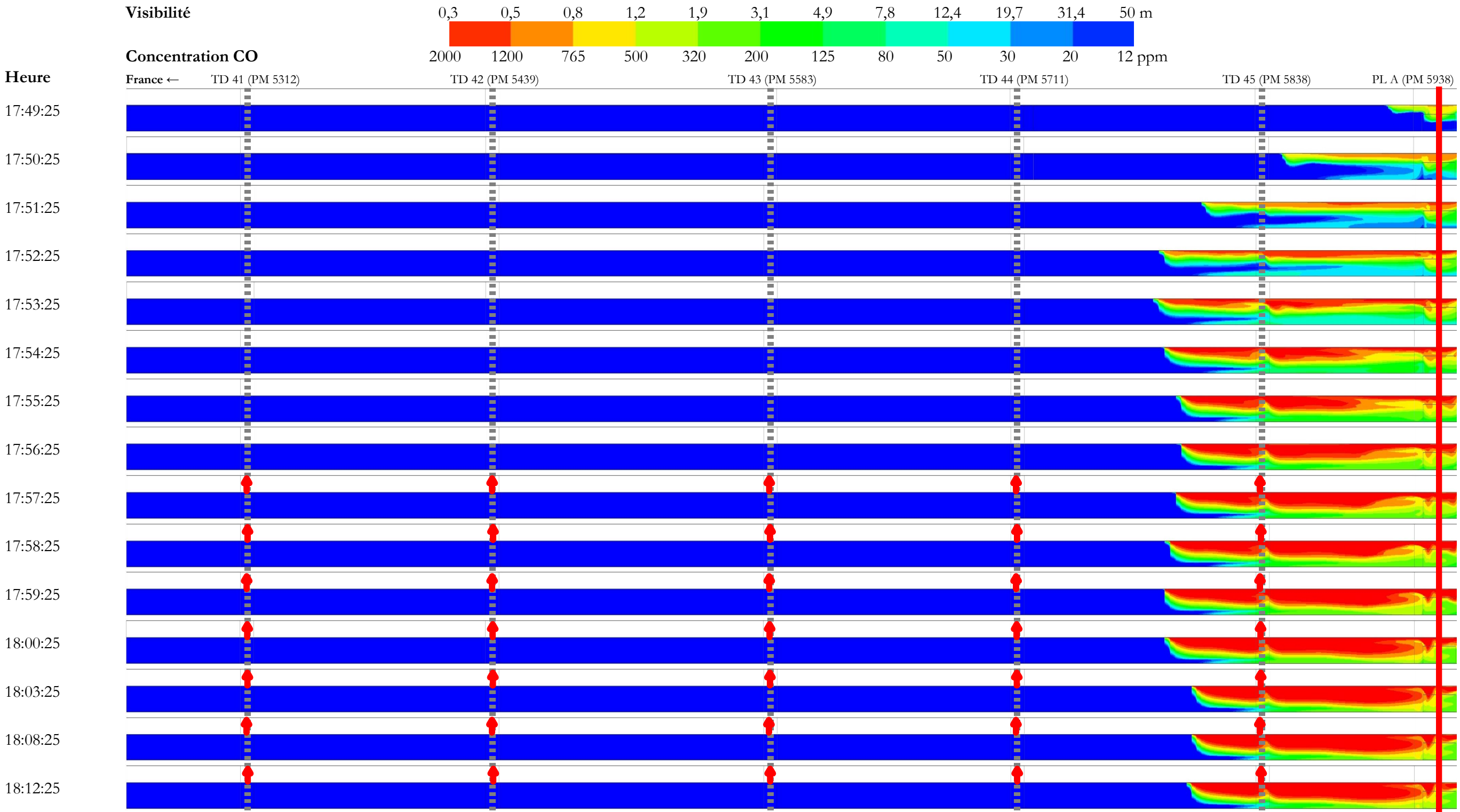
3.5 Inflammation des PL B, C et D

La température avoisine les 400°C sur une large zone de la face avant du PL B. Celui-ci a donc de fortes chances de s'enflammer.

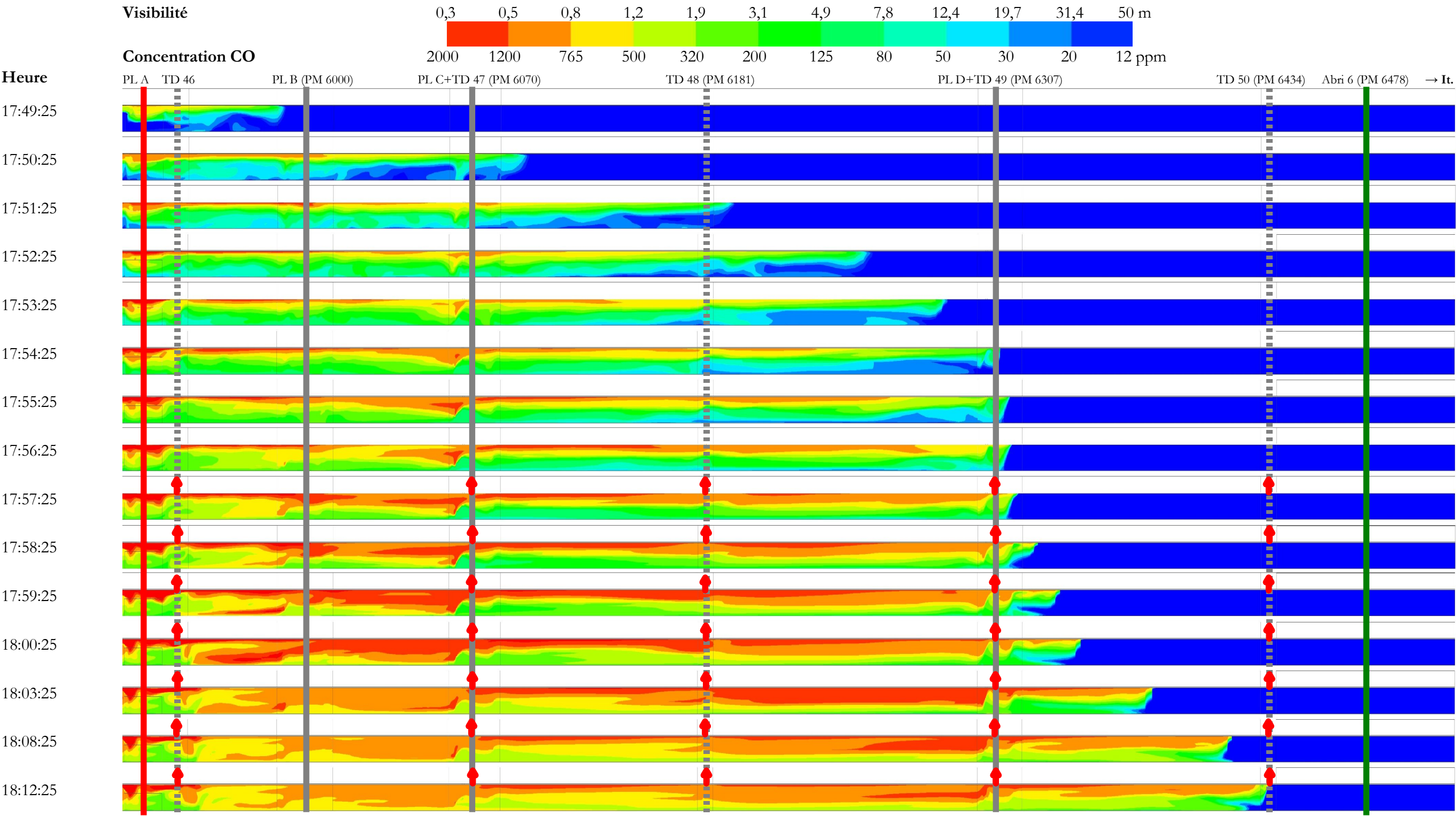
3.6 Résultats détaillés

On donne ci-dessous les champs de concentration en CO et de distance de visibilité des objets réfléchissants, relevés sur le plan médian du tunnel.

3.6.1 Distance de visibilité et concentration en CO sur le plan médian du tunnel du côté France par rapport au PL A



3.6.2 Distance de visibilité et concentration en CO sur le plan médian du tunnel du côté Italiepar rapport au PL A



3.7 Conclusions sur le scénario B

Le scénario B apporte une plus-value significative en termes de possibilités de survie des deux chauffeurs du PL A. Plus que la réduction des concentrations en toxiques, c'est la meilleure maîtrise de la propagation des fronts de fumée qui permettrait à des usagers de rejoindre — certes à tâtons — une zone libre de fumée en un temps assez limité. Le délai de mise en route du désenfumage est donc une donnée cruciale. Dans le scénario A, ce délai de plus de 8 minutes laisse le temps au front de fumée de largement dépasser l'abri 6, et il est ensuite difficile de le ramener en-deçà de ce point. Rappelons à ce propos que la simulation sur un domaine tronqué induit une forte sous-estimation du temps nécessaire pour ramener les fumées dans la zone d'extraction dans le scénario A. En revanche, dans le scénario B, les fumées se propagent jusqu'au PL D (voire moins loin car nous avons déjà vu que la vitesse de développement de l'incendie dans les premières minutes était probablement surestimée) puis n'avancent que très lentement. Dans l'hypothèse où le comportement des deux chauffeurs du PL C reste le même que le 4 juin 2005, ceux-ci auraient probablement eu le temps de quitter la zone enfumée et ensuite pu soit rejoindre l'abri 6, soit être pris en charge par les secours dont l'intervention *via* la tête italienne aurait été facilitée.

Sous réserve que l'hypothèse de puissance soit à peu près correcte, on peut être assez confiant sur les résultats de la simulation, notamment en termes de vitesse des fronts de fumée.

4 Conclusions sur les scénarios alternatifs

Par rapport à la situation rencontrée le 4 juin 2005 et reconstituée dans la phase 2 de la présente étude, les deux scénarios alternatifs étudiés ici font apparaître des améliorations du niveau de sécurité dans l'ouvrage et des chances supplémentaires de survie des chauffeurs du PL C.

Le scénario A permet d'aboutir, en régime établi, à une situation où l'abri 6 se trouve dans une zone libre de fumées. Cet abri s'est révélé stratégique dans l'intervention des secours et aurait peut-être pu être accessible dans un délai plus bref. Cependant, le retard dans le déclenchement du désenfumage provoque un envahissement provisoire par les fumées d'une longueur d'ouvrage importante, qu'il n'a pas été possible de déterminer exactement car le domaine de simulation aurait dû être considérablement rallongé. Le régime établi avec le front de fumée en-deçà de l'abri 6 est donc atteint au bout d'un temps assez long par rapport au délai de survie dans la fumée toxique, probablement de l'ordre de 20 minutes au moins.

Le scénario B suppose quant à lui que le désenfumage est lancé en deux minutes, ce qui correspond aux performances attendues avec l'utilisation de la détection automatique d'incident. Dans ce cas, le front de fumée ne sort jamais de la zone d'extraction. Mieux, le temps nécessaire au développement de l'incendie peut permettre de contenir le front dans une zone encore plus restreinte pendant un certain temps et freiner significativement sa propagation ensuite ; cela peut permettre à des usagers, même fortement ralentis par la fumée, de quitter la zone dangereuse et de trouver ensuite une issue de secours. Cela facilite aussi grandement l'intervention des sapeurs-pompiers.

Les conditions du côté France sont similaires dans les deux scénarios : une nappe de retour existe, les températures à hauteur d'homme sont supportables mais la visibilité dégradée peut être de nature à gêner assez fortement l'intervention des secours.

Dans tous les cas, la nocivité des fumées reste cependant importante et il n'est pas possible d'être affirmatif sur la survie des chauffeurs du PL C.