

Etude numérique de l'influence des véhicules sur la destratification des fumées d'un incendie en tunnel

Frédéric Waymel, Luc Fournier, Emmanuel Ruffin

► **To cite this version:**

Frédéric Waymel, Luc Fournier, Emmanuel Ruffin. Etude numérique de l'influence des véhicules sur la destratification des fumées d'un incendie en tunnel. Les tunnels clés d'une Europe durable, Oct 2005, Chambéry, France. Spécifique. Lyon, pp.199-203, 2005. <ineris-00972502>

HAL Id: ineris-00972502

<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00972502>

Submitted on 3 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ETUDE NUMERIQUE DE L'INFLUENCE DES VEHICULES SUR LA DESTRATIFICATION DES FUMÉES D'UN INCENDIE EN TUNNEL

Frédéric WAYMEL, Luc FOURNIER, Emmanuel RUFFIN INERIS

RESUME : Cet article présente les résultats de quatre simulations CFD réalisées à partir du code de calcul FDS [1]. Cette étude numérique permet de mettre en avant le phénomène de déstratification lié à la présence de véhicules dans un tunnel et de donner une première quantification sur ce niveau de déstratification. Une comparaison est établie de façon systématique entre la configuration tunnel avec obstacle et celle sans obstacle. Les résultats sont présentés pour deux puissances d'incendie type généralement retenues dans le cadre des études spécifiques des dangers des tunnels routiers. Ces premiers résultats ont permis de montrer que la présence de véhicules situés en aval proche de l'incendie favorise la stratification des fumées en limitant le phénomène de rebond des fumées au plafond. Par contre, plus en aval, les structures tourbillonnaires engendrées par ces véhicules accroissent le taux de déstratification.

ABSTRACT : This article shows the results of four CFD simulations made with FDS software [1]. This numerical study deals with the influence of vehicle on stratification loss phenomena in tunnel fire. First evaluations on this influence are then proposed. A comparison is systematically established between the case with vehicles and the case without vehicle. The results shown here after concern two different heat release rate currently used in French hazard studies for road tunnels. These first results have shown that vehicles stopped in the near field upstream improve the stratification by reducing the rebound of smoke plume on the roof. In opposite, vehicles in the far field upstream fire increase the size of turbulent structures, which induces a speed up of stratification loss phenomena.

1 INTRODUCTION

L'incendie reste une préoccupation majeure dans la sécurité des tunnels routiers, ferroviaires et des milieux confinés en général. Afin de mieux comprendre ce phénomène, de nombreuses études ont été réalisées ces quinze dernières années. Parmi celles-ci, citons celles relatives aux problèmes de propagation des fumées comme les essais en tunnel ou les études sur maquette à échelles réduites [2]. Ces recherches ont permis de mieux quantifier certains effets comme par exemple celui du « Back layering » qui apparaît lorsque la vitesse longitudinale est inférieure à une valeur dite « vitesse critique ». Les stratégies de désenfumage ont pu être ainsi améliorées grâce à ces études. Cependant, elles ne représentent pas totalement la réalité d'un incendie en tunnel. En particulier, en tunnel routiers, les obstacles constitués par exemple par les véhicules ou encore les panneaux de signalisation sont rarement pris en compte dans les études alors qu'ils représentent une cause évidente de déstratification des fumées.

S. Bari et J. Naser [3] ont réalisé en 2004 des simulations sur le code CFD FLUENT 6.0 sur le tunnel de raccordement de la ville de Melbourne à la frontière ouest prenant en compte la présence de véhicules lors d'un incendie de bus. Compte tenu de la configuration unidirectionnelle de ce tunnel, seuls les véhicules situés en amont de l'incendie ont été représentés dans ces modélisations ; il a été supposé que tous les véhicules en aval de l'incendie avaient pu évacuer le tunnel. Bien qu'ayant montré des résultats intéressants sur la pollution générée par les moteurs des véhicules laissés allumés créant ainsi des conditions ambiantes difficiles pour l'évacuation en amont de l'incendie, cette étude ne s'est pas intéressée à la stratification des fumées en aval de l'incendie. En effet, lorsque le trafic n'est pas congestionné dans un tunnel unidirectionnel la stratégie consiste à repousser de façon massive les fumées en aval là où il n'y a plus d'usager. Les problèmes de stratification ne nécessitent donc pas d'être évoqués dans ce cas.

En revanche, en tunnel unidirectionnel congestionné ou en tunnel bidirectionnel, il est possible de se trouver dans une situation où les véhicules sont bloqués des deux côtés de l'incendie. Dans le cas où la ventilation est naturelle, semi-transversale avec extraction massive, ou longitudinale, alors la stratification joue un rôle important sur les conditions d'évacuation des usagers situés en aval de l'incendie. Lorsque les installations de ventilation le permettent, l'usage est de maintenir un courant d'air réduit (de l'ordre de 1 à 2 m/s) de façon à maintenir au mieux la stratification

des fumées et afin de favoriser les conditions d'évacuation des usagers. Dans une seconde phase, la lutte contre l'incendie peut s'appuyer sur d'autres stratégies compatibles avec l'intervention des secours.

Afin de mieux évaluer la pertinence de la stratification attendue durant la phase d'évacuation des usagers, l'INERIS travaille sur un projet de recherche visant à quantifier l'influence des véhicules sur le phénomène de déstratification des fumées. Dans le cadre de cette étude, des simulations ont été réalisées sur un tunnel bidirectionnel comportant des véhicules de part et d'autre du foyer. Ces simulations, réalisées à partir du code CFD tridimensionnel FDS 3, font l'objet de cette communication. Quatre simulations sont présentées couvrant deux puissances d'incendie avec ou sans véhicules. Pour chaque simulation, le niveau de stratification a été évalué à partir de la fraction de la puissance adimensionnelle traversant les portions de section de tunnel comprise entre 0 et 1,8 m du sol (hauteur d'homme) à 10, 30, 50, 70, 110 et 150 m en aval de l'incendie. Ce document présente une analyse de ces résultats.

2 MODELISATION DU TUNNEL ET DU FOYER

2.1 Configuration géométrique

Le tunnel choisi pour cette étude est un tunnel bidirectionnel à deux fois une voie et représentatif d'une portion de tunnel de 270 m de long. La section correspond à un profil rectangulaire de 9 m de large et de hauteur $H=5,4$ m. Ces dimensions correspondent de façon assez proche à celles d'un tunnel réel dans lequel peuvent transiter des poids lourds.

Pour les simulations avec la présence de véhicules, ces derniers ont été représentés de façon grossière tout en respectant le gabarit standard. Deux types de véhicules sont considérés : les véhicules légers et les poids lourds. Leurs géométries respectives sont représentées sur la Figure 1 et la Figure 2. Les véhicules sont supposés être à l'arrêt de part et d'autre du foyer d'incendie. La distribution de ces véhicules est de trois véhicules légers pour un poids lourd répartis régulièrement sur les deux voies. La distance entre deux véhicules légers est de 1 m et celle entre un poids lourd et un véhicule léger est de 4 m. Pour chaque voie, seuls les véhicules situés avant l'incendie dans le sens de la circulation ont été représentés sur l'hypothèse que les autres véhicules ont pu évacuer puisqu'ils ne sont pas bloqués par l'incendie. La Figure 3

représente la configuration géométrique des simulations avec la présence de véhicules.

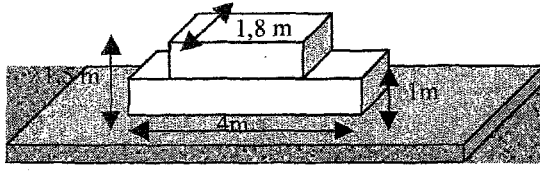


Figure 1 : Représentation schématique d'un véhicule léger

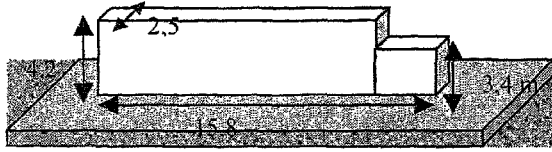


Figure 2 : Représentation schématique d'un poids lourd

NIST Smokeview 3.1 - Apr 9 2003

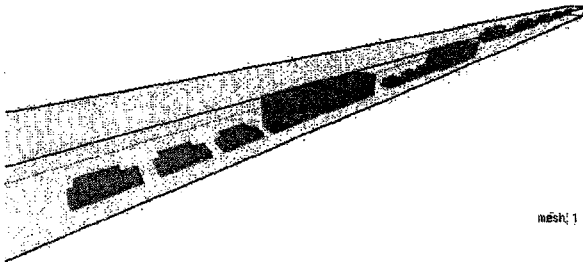


Figure 3 : configuration géométrique du tunnel en présence de véhicules

2.2 Modélisation du foyer

Le foyer d'incendie est positionné à 90 m de l'entrée du tunnel. L'objectif de l'étude étant de montrer l'influence d'obstacle sur la déstratification, nous avons voulu nous affranchir complètement des effets thermiques tels que la radiation et les échanges de chaleur pariétaux qui jouent également un rôle sur la stabilité de la stratification. Leur prise en compte pourrait donc parasiter l'analyse des présents résultats, étant entendu que dans le cadre d'une étude de dangers l'ensemble de ces phénomènes doit être pris en compte.

Les incendie modélisés ici ont des puissances totales plateaux de 8 et 30 MW soit respectivement des puissances convectées fixées à 5,6 et 20 MW. La caractérisation du foyer est basée sur la modélisation de la combustion d'un bac d'heptane de diamètre D est représenté par le système d'équation suivant :

$$\dot{Q}_c = (1 - X_R) \dot{m} S \Delta H_c$$

où \dot{Q}_c est la puissance convective, X_R la fraction radiative, \dot{m} le débit de combustible, S la surface du bac d'heptane et ΔH_c la chaleur de combustion de l'heptane.

$$q_f = (13,7879 + 1,1645n) \dot{m} S \frac{T_f}{T_0}$$

où q_f est le débit de fumées, T_f la température des fumées non diluées et T_0 la température de l'air frais.

$$(30,73 + 2,01.n) \cdot 10^{-3} T_f^2 + (406,98 + 32,71.n) T_f - (877167,78 + 9931,16.n) = 0$$

$$\dot{m} = 0,07839(1 - e^{-0,8.D}) \quad (\text{Babrauskas [4]})$$

$$n = 11(2,13(z/R)^{0,53} - 1)$$

où n est la proportion d'air entraîné d'après Koseki & Yumoto [5], R le rayon de la nappe et z la hauteur.

$$\frac{H_f}{D} = 42 \left[\frac{\dot{m}}{\rho_0 (gD)^{0,5}} \right]^{0,61}$$

où H_f hauteur de flamme d'après Thomas [6].

La proportion d'air entraîné n est fonction de la hauteur z . Le calcul de cette valeur dépend donc de la hauteur pour laquelle nous désirons représenter le panache de fumées. Dans la suite de notre étude, cette valeur a été fixée à 5 m, c'est à dire juste avant l'impact des fumées au plafond. A cette hauteur, on peut considérer que la proportion d'air entraîné est maximale.

La fraction radiative X_R est prise égale à 0,3.

A partir d'une puissance convective fixée et de ce système d'équation, il est possible d'en déduire le diamètre du bac, la température et le débit de fumées à représenter.

Pour tenir compte de la composition et de la température des fumées les résultats sont discutés en terme de variation de densité du mélange air-fumées. Cette densité est calculée à partir de la relation température - densité suivante :

$$\rho_m = \rho_0 \frac{T_0}{T_f}$$

où ρ_m est la masse volumique des fumées produites par le panache et ρ_0 la masse volumique de l'air ambiant apporté par la ventilation.

3 LE MODELE NUMERIQUE

3.1 Modèle de résolution des équations de conservation

L'outil de simulation utilisé pour ces modélisations est FDS (Fire Dynamic Simulator) développé par le NIST (National Institute of Standards and Technology). Ce code de calcul considère un domaine 3D représenté par un maillage structuré multiblocs.

Le logiciel FDS est conçu pour la simulation numérique d'incendies. Plus précisément, un écoulement réactif à faible nombre de Mach est simulé. Cet écoulement est donc peu compressible et est piloté en partie par des phénomènes de variation de densité des gaz nécessitant la prise en compte des termes de flottabilité.

La simulation de cet écoulement passe par la résolution des équations de Navier Stokes couplées à des modèles chimiques et thermiques. Ceci comprend les équations de conservation de la masse, des espèces chimiques, de la quantité de mouvement et de l'énergie. La fermeture est effectuée par une équation d'état : la relation des gaz parfaits appliquée à un mélange auquel est associé le calcul de la variation des propriétés du mélange selon sa constitution et la température.

3.2 Le modèle de turbulence retenu

Le modèle de turbulence qui est utilisé est fondé sur une approche L.E.S. : Large Eddy Simulation avec le modèle de sous-maille de Smagorinski [7]. Cette approche est basée sur le principe de filtrage des petites échelles de la turbulence. Les grandes structures (ayant un rôle de transport) sont simulées directement par la résolution des équations de Navier-Stokes tandis que les petites structures (ayant un rôle dissipatif) sont modélisées. D'un point de vue pratique, ce filtrage est associé au maillage et le modèle de Smagorinski consiste à ajouter à chaque maille de calcul une viscosité de sous-maille représentant les phénomènes dissipatifs des petites structures. Ce type de modélisation permet de représenter la nature tridimensionnelle et instationnaire, caractéristique des écoulements turbulents.

Par conséquent, à l'image des modèles moyennés comme par exemple les modèles k- ϵ , il est nécessaire de traiter les résultats obtenus par une approche statistique. Ceci est réalisé ici au niveau du post-traitement des résultats en utilisant l'hypothèse d'ergodicité

(la moyenne sur un ensemble d'échantillons est équivalente à une moyenne temporelle) puisque l'écoulement est considéré suffisamment stationnaire.

4 PRESENTATION DES SIMULATIONS

4.1 Les paramètres de calculs

Les calculs ont été réalisés sur un maillage multi-blocs comprenant 253 260 cellules au total dont 100 800 sur une zone de 10 m de long centrée sur le foyer. Ce maillage est représenté en partie sur la Figure 4.

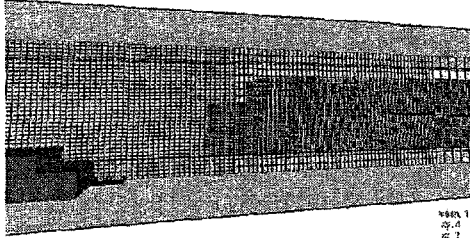


Figure 4 : maillage à proximité du foyer

Quatre simulations ont été réalisées sur la base de deux puissances théoriques d'incendie retenues dans le guide des Etudes Spécifiques des Dangers (8 et 30 MW). Ces puissances correspondent à des incendies types impliquant soit des véhicules légers soit un poids lourds. Les puissances convectives maximales ainsi modélisées sont donc respectivement de 5,6 MW et de 20 MW. Chaque modélisation est réalisée avec un courant d'air longitudinal dont la vitesse est proche de la vitesse critique. Cette vitesse a été retenue car elle permet de repousser les fumées d'un seul côté du foyer tout en limitant le phénomène de déstratification que pourrait induire les turbulences générées par un courant d'air longitudinal trop important en l'absence même de véhicules. Elle représente la vitesse d'air la plus favorable aux effets de stratification. Cette vitesse est calculée à partir des équations proposées par Danziger et Kennedy [8] :

$$\begin{cases} U_c = 0,61(g P_c H / C_p \rho_0 A T_f)^{1/3} \\ T_f = (P_c / C_p \rho_0 A U_c) + T_0 \end{cases}$$

A étant la section du tunnel et P_c la puissance convective de l'incendie.

In fine, l'ensemble des paramètres de calculs utilisés pour les quatre modélisations sont regroupés dans le tableau suivant :

Cas	P_c (MW)	q_r (m^2/s)	ρ_m (kg/m^3)	Vit. Long (m/s)	Véhicules
Calc 1	5,6	27,2	0,53	1,7	Oui
Calc 2	5,6	27,2	0,53	1,7	Non
Calc 3	20	85,7	0,52	2,6	Oui
Calc 4	20	85,7	0,52	2,6	Non

Tableau 1: paramètres de calculs

4.2 Résultats et discussions

Les résultats présentés par la suite correspondent aux caractéristiques de l'écoulement moyen obtenus en moyennant les résultats de calcul sur une période de 200 s après établissement de l'écoulement. Ce temps de moyennage est suffisant pour obtenir des valeurs représentatives au regard des échelles de temps de la turbulence et du phénomène étudié.

Les profils de variations de densité sont présentés pour six sections en aval du foyer pour l'ensemble des simulations réalisées de la Figure 6 à la Figure 10. Les taux de variations représentés sont calculés par la relation suivante :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = \frac{(\rho_0 - \rho)}{\rho_0}$$

Ce taux de variation compris entre 0 et 1 est représentatif de la température des fumées pour un incendie réel. Lorsque sa valeur est nulle, la température correspond à la température de l'air frais apporté par la ventilation. En revanche, lorsqu'il est égal à 0,625, cela correspond à de l'hélium pur simulant ainsi une température de 1300°C. Ces résultats montrent bien que la variation de densité et par conséquent la température des fumées et systématiquement plus importante pour les calculs 3 et 4 qui correspondent à une puissance convective libérée de 20 MW. Il est intéressant d'observer que sur la section située à 10 m en aval de l'incendie, les profils ne présentent pas un gradient stable comparativement aux autres sections pour lesquelles on observe un profil quadratique. Cette différence est notamment expliquée par les écoulements rencontrés au voisinage de l'incendie. En effet, l'impact du courant d'air longitudinal sur le panache d'une part, et la collision du panache avec le plafond d'autre part, sont générateurs de turbulences caractérisées par de grosses structures tourbillonnaires qui défavorisent la gravitation des fumées chaudes vers le plafond. Toutefois, il est possible d'observer la présence d'air frais au niveau du sol pour les simulations correspondant à une puissance convective de 5,6 MW.

En observant la progression des profils de section en section, on peut constater que ceux-ci s'aplatissent sensiblement au fur et à mesure de la progression des fumées dans le tunnel. Cette observation se traduit par une homogénéisation de la température sur la section lorsqu'on s'éloigne du foyer. Ce constat manifeste donc bien le phénomène de déstratification quel que soit le cas simulé. Il est également intéressant de remarquer qu'à puissances d'incendie égales, la stratification est meilleure lorsqu'il y a présence de véhicules dans le tunnel en particulier entre 30 m et 70 m en aval du foyer. En effet, lorsqu'il y a présence de véhicules, la température au niveau du plafond est toujours plus importante et celle au niveau du sol est toujours plus faible comparativement à la configuration sans véhicules. Par contre, au delà de 50 m, les profils en présence de véhicules s'aplatissent d'autant plus rapidement que ceux en l'absence de véhicules. Ces résultats montrent donc que même si la stratification est meilleure en présence de véhicules en aval proche de l'incendie, sa stabilité un peu plus en aval est toutefois moins garantie que dans la configuration sans véhicule. A une distance suffisante du foyer, la tendance devrait s'inverser et la stratification deviendrait de ce fait meilleure en l'absence de véhicules.

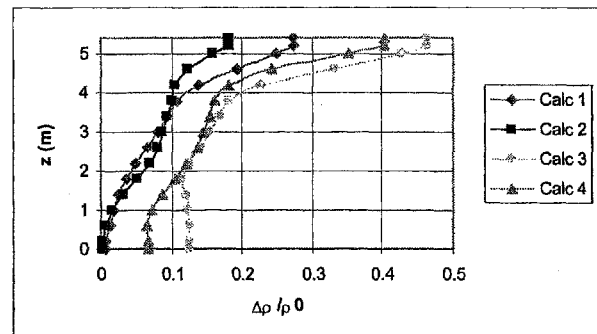


Figure 5 : Variation de la densité, 10 en aval du foyer

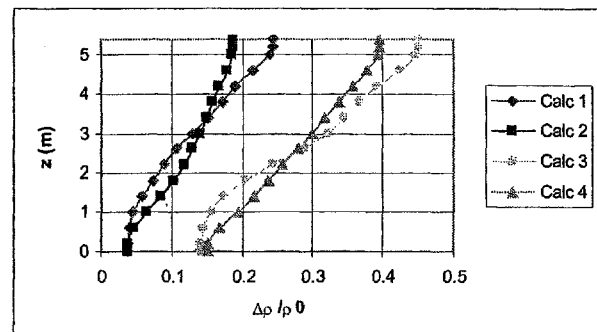


Figure 6 : Profils de variation de la densité, 30 en aval du foyer

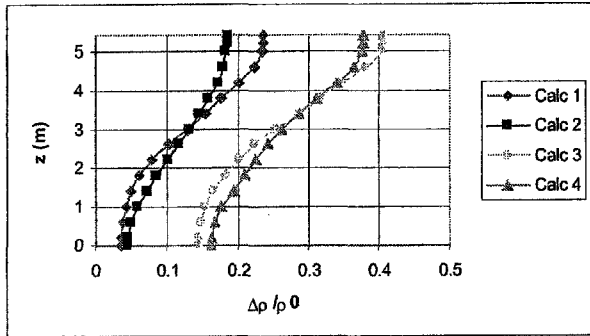


Figure 7 : Profils de variation de la densité, 50 en aval du foyer

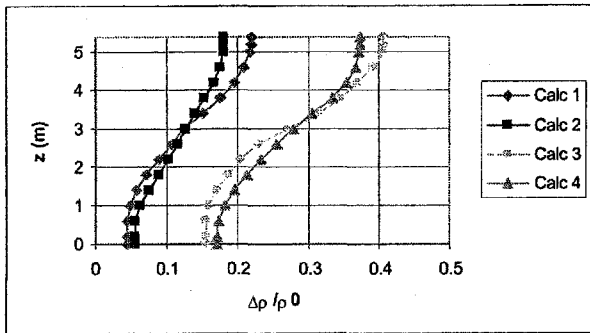


Figure 8 : Profils de variation de la densité, 70 en aval du foyer

Erreur! Liaison incorrecte. Figure 9 : Profils de variation de la densité, 110 en aval du foyer

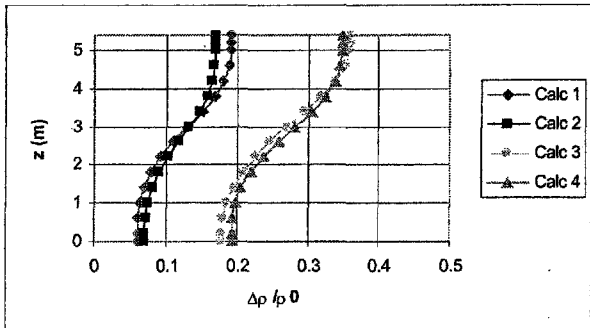


Figure 10 : Profils de variation de la densité, 150 en aval du foyer

La méthode utilisée par la suite pour évaluer de façon plus précise la déstratification se base sur la répartition de la puissance convective traversant une section du tunnel. Les résultats de la Figure 11 montrent la part de la puissance convective traversant chaque section jusqu'à 1,8 m au dessus du sol (hauteur d'homme). Cette part est calculée à partir de l'intégration de la puissance adimensionnelle sur cette hauteur rapportée à la puissance adimensionnelle totale traversant l'ensemble de la section du tunnel. Ce calcul est ainsi défini par la relation suivante :

$$\%Q = \frac{\int_{z=0}^{z=H} (\rho_0 - \rho(z)) u(z) dz}{\int_{z=0}^{z=2m} (\rho_0 - \rho(z)) u(z) dz} \times 100$$

Pour mémoire, $\rho_0 - \rho(z)$ est proportionnel à l'enthalpie en considérant un écoulement isobare de fluide parfait et l'absence de variation de la capacité calorifique C_p avec la température et/ou le mélange gazeux.

Les résultats obtenus montrent de nouveau qu'à puissances égales, la déstratification en aval proche du foyer est toujours plus importante sans véhicules. Ce résultat pourrait s'expliquer par le phénomène de rebond du panache de fumée au plafond. Les véhicules, en particulier le camion situé en aval proche du foyer, pourrait limiter l'apparition de ce phénomène en créant une veine d'écoulement en partie supérieure du tunnel. Les véhicules en amont peuvent également jouer un rôle sur les écoulements en autour du foyer. En effet, ces véhicules peuvent limiter l'impact du courant d'air longitudinal sur le panache au droit du foyer et favoriser ainsi la migration des fumées vers le plafond.

Entre 30 et 50 m en aval, la part de la puissance diminue pour les cas 1, 2 et 3, ce qui traduit alors une remontée des fumées vers le plafond. En prenant l'exemple des calculs 1 et 2, correspondant à la puissance convective de 5,6 MW, les résultats montrent que cette 'remontée' des fumées est beaucoup plus prononcée en l'absence de véhicules. Ceci montre bien que deux effets s'opposent en présence de véhicules : l'effet de flottabilité lié à la faible densité des fumées qui alimente la stratification puis, les turbulences générées par les véhicules qui, au contraire, la détruisent. Lorsque la puissance d'incendie n'est pas trop élevée, le volume de fumées est suffisamment faible pour rester cantonné en partie supérieure du tunnel et limiter ainsi leur contact avec les véhicules. En revanche, comme le montre le cas 3, pour un incendie plus important, les fumées occupent une plus grande partie de la section supérieure du tunnel. Leur impact avec les véhicules est donc plus important. Les turbulences l'emportent alors sur les effets de flottabilité, ce qui empêche une stratification efficace.

Au-delà de 50 m, la stratification perd de sa stabilité pour l'ensemble des cas simulés. Comme il a été constaté sur les profils de variation de densité, cette perte de stratification croît plus rapidement en présence de véhicules en raison des grosses structures turbulentes induites par les véhicules.

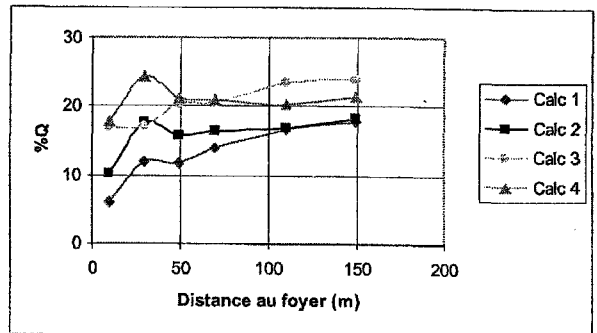


Figure 11 : Taux de puissance convective entre 0 et 1,8 m au-dessus du sol

Afin de quantifier l'intensité de déstratification, nous proposons de représenter la dérivée spatiale de la part de puissance adimensionnelle traversant le tunnel entre 0 et 1,8 m :

$$I_d = \frac{1}{100} \frac{d(\%Q)}{dx}$$

où d/dx désigne la dérivation spatiale selon l'axe du tunnel.

La Figure 12 représente cette intensité pour l'ensemble des calculs réalisés. Les valeurs positives correspondent à une diminution de la stratification. Au contraire, les valeurs négatives traduisent une augmentation de la stratification des fumées.

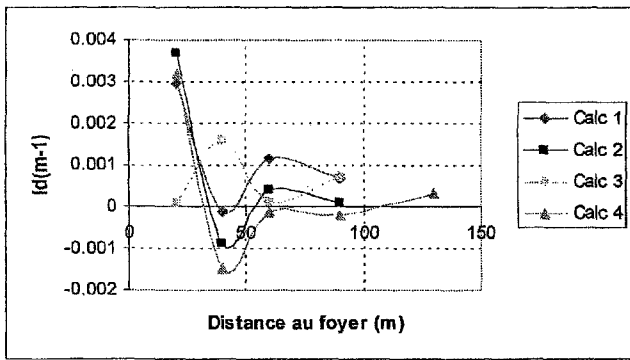


Figure 12 : Intensité de déstratification

5 CONCLUSIONS

Cette étude a permis de mettre en évidence plusieurs paramètres qui peuvent intervenir sur la stratification des fumées lors d'un incendie en tunnel routier. En particulier, la présence de véhicules favorise dans un premier temps la montée des fumées en partie supérieure du tunnel en limitant l'effet de rebond du panache au plafond. Les véhicules en amont du foyer permettent également de protéger le panache vis à vis du courant d'air longitudinal, ce qui réduit les phénomènes de dilution des fumées à la source. Par contre, au-delà de 30 m en aval du foyer, l'intensité du phénomène de déstratification devient plus important en présence de véhicules compte tenu des effets de turbulences plus intenses.

De nombreux paramètres doivent encore être explorés comme la vitesse du courant d'air longitudinal pour laquelle un accroissement devrait se traduire par une augmentation de la turbulence autour des véhicules et de ce fait, accroître l'intensité de déstratification. La proportion entre poids lourds et véhicules légers, et leur position à proximité du foyer devraient également jouer un rôle important sur la stratification.

Ces résultats donnent toutefois un premier aperçu de l'influence d'obstacles sur les phénomènes de stratification de manière générale ; résultats qui seront approfondis lors d'une campagne expérimentale sur maquette froide à échelle réduite.

REFERENCES

- [1] K.B. Mc Grattan & Al., "Fire Dynamic Simulator (Version 3)- Technical Reference Guide", NIST, NISTIR 6783, 2002 Ed.
- [2] O. Megret, "Etude expérimentale de la propagation des fumées d'incendie en tunnel pour différents systèmes de ventilation", Thèse, LME-Université de Valenciennes, 1999.
- [3] S. Bari, J. Naser, "Simulation of smoke from a burning vehicle and pollution levels caused by traffic jam in a road tunnel", Tunnelling and Underground Space Technology, 2004.
- [4] V. Babrauskas, "Estimating large pool fire burning rates", Fire Technology, 19, n°4, p. 251, 1983
- [5] H. Koseki, T. Yumoto, "Air entrainment and thermal radiation from heptane pool fires", Fire Technology, 1988.
- [6] P.H. Thomas, "The size of flames from natural fires", 9th International Combustion Symposium, 1963
- [7] J. Smagorinski, "General circulation experiments with the primitive equations. I. The Basic Experiment", Monthly Weather Review, 91-99-164, 1963
- [8] N.H. Danziger, W.D. Kennedy., "Longitudinal ventilation analysis for the Glenwood Canyon tunnels", Proc. 4th Int. Symp. Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, pp 169-186, 1982