

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 1
Préparation et calage du modèle**

Septembre 2007



Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

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

Table des matières

1 Géométrie.....	4
2 Maillage.....	5
3 Modèles physiques.....	6
3.1 Représentation du foyer.....	6
3.2 Turbulence.....	7
3.3 Transferts thermiques.....	7
4 Conditions aux limites et initialisation.....	8
4.1 Conditions aux extrémités du tronçon de tunnel modélisé.....	8
4.2 Conditions en extrémité de gaine d'extraction.....	8
4.3 Soufflage d'air frais.....	9
4.4 Trappes de désenfumage.....	9
4.5 Initialisation des calculs.....	9
5 Paramètres numériques.....	10
5.1 Schémas numériques.....	10
5.2 Pas de discrétisation temporelle.....	10
5.3 Résidu cible.....	10
6 Conclusion.....	11

1 Géométrie

La section du tunnel a été représentée en utilisant uniquement des arcs de cercle et des segments de droite. Cela donne une bonne approximation de la section, en conservant notamment de manière précise les grandeurs géométriques suivantes :

- section aérée du tunnel,
- largeur maximale entre piédroits,
- hauteur sous plafond,
- périmètre du tunnel,
- section aérée de la gaine de désenfumage,
- périmètre de la gaine de désenfumage.

Les détails géométriques tels que les trottoirs, les équipements fixés aux piédroits ou à la voûte, les niches de sécurité, etc. n'ont pas été représentés. Leur modélisation aurait nécessité, d'une part, un temps de préparation très long, et d'autre part un maillage nettement plus fin et donc une forte augmentation du temps de calcul.

Il n'est pas nécessaire de modéliser toute la longueur du tunnel (12 833 m). En spécifiant des conditions aux limites appropriées (voir plus loin), on peut « couper » artificiellement le tunnel tout en simulant l'écoulement de manière rigoureuse. Il est cependant intéressant de simuler au moins la longueur d'ouvrage sur laquelle le désenfumage est effectué, c'est-à-dire un peu plus de 1200 m. La longueur du domaine de calcul a donc été fixée à 1300 m. Les limites sont différentes selon les cas étudiés : reconstitution de l'incendie réel ou étude d'hypothèses alternatives pour lesquelles le désenfumage est effectué avec d'autres trappes. Pour le calcul de la phase 4, le domaine sera rallongé.

2 Maillage

Pour la simulation numérique des écoulements en tunnel, le maillage hexaédrique s'impose naturellement (voir annexe). Il permet en effet, contrairement au maillage tétraédrique, d'utiliser des mailles fortement déformées dans une des directions spatiales tout en conservant des angles entre faces suffisamment proches de 90° pour obtenir une bonne convergence. On peut ainsi suivre les proportions géométriques d'un tunnel. Un maillage tétraédrique nécessiterait un nombre de cellules beaucoup plus important.

Le maillage final comporte environ 1 200 000 hexaèdres dont 100 000 dans le domaine solide (dalle de faux plafond). La plupart d'entre eux se trouvent dans les nombreuses zones où le maillage doit être raffiné par rapport à une section courante : les trappes de désenfumage et leur voisinage, autour des obstacles (les différents poids lourds arrêtés dans le tunnel), et surtout dans la zone du foyer en raison des très forts gradients de température et des vitesses élevées. L'épaisseur des premières mailles à la paroi est de l'ordre de quelques centimètres, ce qui est cohérent avec la bonne utilisation des lois de paroi (l'écoulement près des parois est modélisé par des lois semi-empiriques qui nécessitent un maillage adapté) et le niveau de détail recherché.

Les trappes de désenfumage sont maillées avec 10 éléments au moins dans chaque dimension. Ce maillage assez fin est nécessaire car peu d'études permettent de savoir quel niveau de détail est nécessaire pour bien évaluer l'efficacité des trappes.

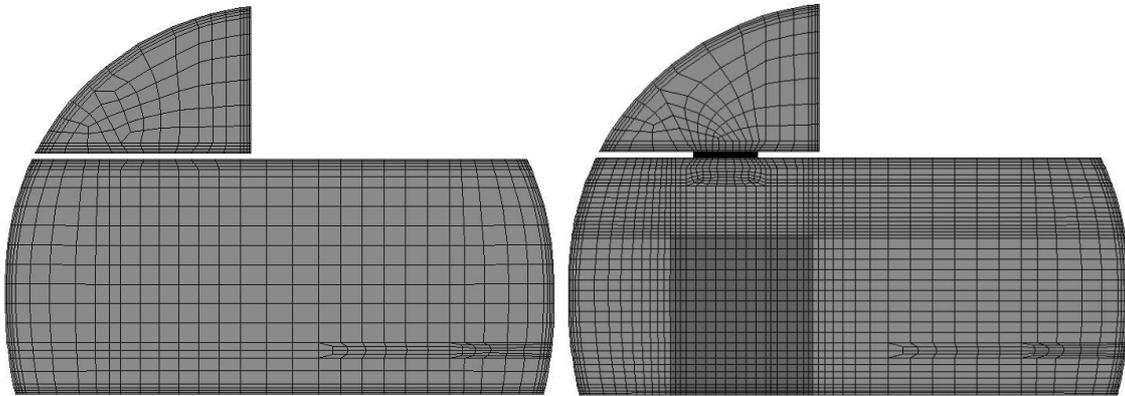


Figure 1 : Maillage d'une section courante (à gauche) et au droit du PLA (à droite).

3 Modèles physiques

3.1 Représentation du foyer

La modélisation de la combustion n'a pas été utilisée pour différentes raisons :

- Le temps de calcul s'en trouvait considérablement augmenté et la stabilité numérique était incertaine, notamment lorsque le modèle calculant la production de suies était utilisé.
- Les températures obtenues étaient trop élevées (plus de 2000°C), ce qui est courant avec les modèles de combustion simples.
- La forme des flammes telle que calculée par le code ne semblait pas plus satisfaisante qu'avec une source volumique de chaleur.
- Un modèle de combustion utilisant une chimie simplifiée ne permet pas de calculer la production des substances toxiques telles que CO, HCN, HCl, etc. De plus, en l'absence de modèle de pyrolyse et de propagation de flamme, il faut utiliser un combustible « modèle » (hydrocarbure courant type méthane, propane etc.) dont la combustion ne donne pas les mêmes produits que le combustible réel. L'évolution temporelle de la puissance du feu reste en outre une hypothèse, et non un résultat du calcul.

Il a donc été décidé d'utiliser une source volumique de chaleur en remplacement du modèle de combustion, avec certaines améliorations :

- Le foyer produit un traceur passif représentant la propagation des suies ou des gaz toxiques. Le taux de production de ce traceur est proportionnel à la puissance de l'incendie. Connaissant le taux de production d'une substance donnée, il est ainsi possible d'estimer le champ de concentration par une règle de trois.
- Les propriétés radiatives de l'air (pour le transfert de chaleur, la visibilité faisant l'objet d'un traitement différent) ont été modifiées et dépendent de ce traceur passif selon les hypothèses suivantes :
 - le combustible est le caoutchouc synthétique styrène-butadiène (principal constituant des pneus), dont la chaleur de combustion est connue,
 - 10% du combustible brûlé (en masse) est transformé en suies, valeur typique pour ce type de combustible très fumigène,
 - le coefficient d'absorption du mélange gazeux est fonction de la concentration en suies selon la formule semi-empirique donnée par Tien, Lee et Stretton (Radiation Heat Transfer, in *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3^{ème} édition, SFPE/NFPA, 2002).
- Le rayonnement produit par le foyer (1/3 de la puissance totale) a été inclus sous la forme d'une source de rayonnement isotrope à la périphérie de la source de chaleur.

3.2 Turbulence

Le modèle de turbulence choisi est le classique $k - \epsilon$ avec inclusion de tous les termes de flottabilité, comme préconisé par F. Demouge (*Contribution à l'étude de la stratification des fumées dans le cas d'un incendie en tunnel routier*, thèse de doctorat, université Claude Bernard Lyon I, 2002). Des études précédemment réalisées au Cetu, ainsi que des tests préliminaires pour la présente étude, n'ont pas montré de différence significative avec le modèle SST (*Shear Stress Transfer*), souvent préconisé par les éditeurs de logiciels, pour l'application aux incendies en tunnel. Il a en outre été décelé des erreurs numériques conduisant à un « plantage » du calcul lors de l'utilisation du modèle SST, probablement dues à des bogues de « jeunesse » du code de calcul, le modèle SST ayant été implémenté récemment dans le logiciel.

3.3 Transferts thermiques

La modélisation complète de la conduction dans les parois aurait conduit à un maillage lourd. On a donc choisi de limiter la modélisation du solide à la dalle de faux plafond. C'est en effet sous le plafond qu'on trouve les températures les plus élevées et donc la plus grande partie du transfert thermique. En outre, c'est cet élément de structure qui présente les plus forts enjeux de tenue au feu (pérennité de la ventilation et des cheminements en gaine d'air frais).

Sur les piédroits et la chaussée, ainsi que sur les parois des obstacles, on a imposé un coefficient d'échange constant de $10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Le rayonnement a été modélisé par une technique de tir de rayons. L'émissivité des parois solides a été prise égale à 0,9.

4 Conditions aux limites et initialisation

4.1 Conditions aux extrémités du tronçon de tunnel modélisé

Ces conditions doivent faire l'objet d'un traitement particulièrement soigné pour pouvoir représenter de manière fiable ce qui se passe dans les parties non modélisées.

Premièrement, les fumées peuvent dans certains cas sortir du domaine de calcul. Des conditions aux limites en pression ont donc été choisies car des conditions en vitesse auraient pu contraindre le phénomène en empêchant les fumées de sortir ou en imposant leur débit.

Ces conditions ont été calées en utilisant des simulations monodimensionnelles. Le calcul 1D est en effet approprié pour simuler l'écoulement dans les parties de l'ouvrage qui ne sont pas concernées par l'enfumage. On relève les valeurs de la pression aux abscisses correspondant aux limites du domaine de simulation 3D. Il faut ensuite vérifier la conformité des valeurs de vitesse ainsi calculées par le code 3D et, au besoin, ajuster les valeurs de pression. En effet, les phénomènes de perte de charge sont notoirement assez mal reproduits par le calcul CFD, à moins d'utiliser des maillages très fins à proximité des parois.

Une autre solution aurait pu être de régler les valeurs de pression aux limites à la pression atmosphérique en tête de tunnel et de représenter les tronçons non maillés par un coefficient de perte de charge singulière. Cette solution a été rapidement abandonnée car le calcul des coefficients était très délicat (dépendant des conditions de ventilation dans tout l'ouvrage) et leurs valeurs considérablement élevées, d'où des divergences numériques.

Les conditions en turbulence ont été calées à partir de simulations préalables isothermes de manière à obtenir un profil de turbulence bien établi, similaire à celui observé après que l'air a parcouru quelques centaines de mètres de tunnel.

4.2 Conditions en extrémité de gaine d'extraction

Le débit d'extraction a été réparti entre les deux extrémités du tronçon de gaine modélisé. La répartition était légèrement déséquilibrée pour éviter la présence d'une zone de stagnation au centre du tronçon. Les régions où l'écoulement stagne sont en effet très difficiles à résoudre numériquement (on se rapproche d'équations du type « $0 + 0 = 0$ » et le modèle de turbulence n'a plus de validité physique).

Pour des raisons similaires, le débit d'extraction n'a pas été pris nul avant le démarrage du désenfumage. On peut aussi citer des raisons physiques comme la présence de fuites et, dans le cas du tunnel du Fréjus, le tirage thermique dans les puits de ventilation qui crée une extraction naturelle.

4.3 Soufflage d'air frais

Le soufflage est effectué par des bouches de ventilation situées tous les 5 m environ. Leur représentation individuelle aurait été très consommatrice en maillage. Il a donc été choisi de représenter le soufflage par une source volumique de masse et de quantité de mouvement répartie sur tout le domaine de simulation. Bien entendu, les débits globaux sont conservés.

4.4 Trappes de désenfumage

Les trappes ne constituent pas une condition aux limites mais il a fallu y introduire une perte de charge pour assurer la bonne répartition des débits entre les trappes. Physiquement, il existe une grille qui assure cette fonction. Dans le modèle numérique, on a simulé la trappe comme un milieu poreux. La valeur de la perte de charge importe peu tant qu'elle est suffisante pour que les débits soient sensiblement égaux entre les trappes. Il ne faut pas non plus qu'elle soit trop grande pour garder des gradients de pression raisonnables.

4.5 Initialisation des calculs

Chaque calcul anisotherme transitoire a été initialisé par un calcul isotherme stationnaire. On démarre ainsi le calcul à partir d'un champ de vitesse et de turbulence physiquement valide et d'une solution numérique convergée.

5 Paramètres numériques

5.1 Schémas numériques

Les principaux paramètres numériques sont les schémas de discrétisation en temps et en espace. Les schémas précis à l'ordre 2 sont moins stables que les schémas d'ordre 1. En revanche, ils réduisent fortement la diffusion numérique. CFX propose un schéma de discrétisation spatiale dit « High Resolution » qui est un hybride de schémas d'ordre 1 et 2 dans des « proportions » variables. Il se rapproche le plus possible de l'ordre 2 en fonction des conditions locales, en gardant une bonne stabilité. Ce schéma « High Resolution » a été utilisé avec un schéma de discrétisation temporelle d'ordre 2, sauf pour les équations de transport de la turbulence (pour lesquelles l'utilisation de schémas du premier ordre est obligatoire dans CFX) et du traceur passif (afin que le traceur passif ne pénalise pas la convergence comme cela a été constaté dans certains calculs préliminaires).

5.2 Pas de discrétisation temporelle

Le pas de temps a été fixé à 0,25 s après essais. CFX utilisant des schémas implicites donc inconditionnellement stables, le pas de temps peut en théorie être augmenté à volonté. Cependant, pour une précision correcte, il convient de tenir compte des échelles de vitesse et de longueur du modèle.

En fin de calcul, lorsqu'un régime quasi-permanent est atteint, la convergence est bien meilleure et il est alors possible d'augmenter le pas de temps jusqu'à 0,5 voire 1 s, ce qui permet un gain considérable en temps de calcul.

5.3 Résidu cible

Le résidu cible pour la convergence numérique est de 10^{-4} en moyenne. Cette valeur est considérée comme médiocre dans la documentation du code, qui prend comme référence des applications industrielles de dimensionnement. Dans notre cas, on peut considérer que les incertitudes sur les termes sources et les différentes perturbations de l'écoulement sont largement supérieures à l'imprécision induite par cette convergence relativement « lâche ». De plus, viser une meilleure convergence aurait fait croître les temps de calcul de façon déraisonnable.

6 Conclusion

Cette phase préliminaire avait pour but de faire les principaux choix en matière de modélisation. Il n'existe bien sûr pas de solution idéale ; toute modélisation numérique est un compromis entre la précision recherchée, le niveau de détail des données d'entrée et le temps et les moyens de calcul à disposition.

Les approximations effectuées sont à mettre en relation avec les incertitudes sur les données d'entrée : conditions de ventilation, caractéristiques du foyer, perturbations diverses. Ces incertitudes sont importantes ici. Il faut également garder à l'esprit l'objectif principal de l'étude, qui est la comparaison de différentes hypothèses de puissance (fortement différentes) et de différents scénarios de ventilation.