



HAL
open science

Modélisation du couplage incendie-ventilation en tunnel par une approche 3D

Benjamin Truchot

► **To cite this version:**

Benjamin Truchot. Modélisation du couplage incendie-ventilation en tunnel par une approche 3D. Rapport Scientifique INERIS, 2008, 2007-2008, pp.76-79. ineris-01869203

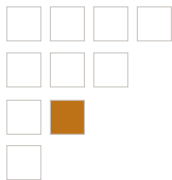
HAL Id: ineris-01869203

<https://ineris.hal.science/ineris-01869203>

Submitted on 6 Sep 2018

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.



SYSTÈMES INDUSTRIELS COMPLEXES

Modélisation du couplage incendie – ventilation en tunnel par une approche 3D

> **BENJAMIN TRUCHOT**

Les nombreux incidents et accidents en tunnel de ces dernières années, tunnel du Mont-Blanc, tunnel du Fréjus, tunnel du Tauern, tunnel Gheizho, funiculaire de Kaprun... ont engendré une prise de conscience générale de ce type de risque, et plus particulièrement du risque incendie. Par ailleurs, l'accroissement continu de la menace intentionnelle pour toutes les infrastructures, et plus particulièrement celles de transport, implique de considérer les phénomènes dangereux avec de plus en plus d'attention. Ainsi, si une approche de type 1D permet souvent de modéliser le comportement d'un incendie en tunnel^[1,2] avec une précision suffisante pour dimensionner le système de ventilation.

Certaines situations nécessitent une approche plus fine. Notamment, la réponse d'une nappe de fumée stratifiée à une perturbation ne peut être estimée que par un calcul 3D^[3] et les moyens expérimentaux. Dans ce contexte, le projet EGSISTES (Evaluation Globale de la Sécurité Intrinsèque des Systèmes de Transport En Souterrain) s'intéresse à la stabilité d'une nappe stratifiée en cas d'incendie de véhicules dans un tunnel. Des essais d'incendie vont être réalisés dans la galerie incendie de l'INERIS^[4]. Les résultats de ces essais permettront d'appréhender plus finement la physique des phénomènes et de développer des modèles physiques qui seront validés sur ces mêmes essais. Au préalable, des simulations 3D permettent de définir les configurations expérimentales les plus pertinentes, les résultats des essais seront ensuite comparés aux simulations afin de valider et améliorer ces dernières.

CALCUL 3D ET ÉCOULEMENTS EN TUNNELS

De nombreux codes de calcul CFD (Computational Fluid Dynamics) sont aujourd'hui disponibles sur le marché, depuis les codes génériques, les plus connus (Fluent, CFX, ...) jusqu'aux codes spécifiques, souvent connus uniquement par les spécialistes du domaine (FDS, par exemple, pour la modélisation des incendies). Tous ces codes

sont basés sur une approche similaire de discrétisation du domaine et de résolution des équations de Navier-Stokes. mais différent dans les schémas numériques et les sous-modèles utilisés.

Dans le domaine de la simulation des incendies, l'INERIS utilise l'outil FDS (Fire Dynamics Simulator), développé par le NIST (National Institute of Standard and Technology) et distribué en Open-Source. Après une présentation de la physique impliquée dans les écoulements en tunnels, les paragraphes suivants présentent l'approche CFD de manière générale mais succincte, tous les détails concernant les modèles utilisés dans FDS sont décrits dans ^[5]. La description des modèles est orientée sur les besoins des modélisations en tunnel.

NOTIONS DE MÉCANIQUE DES FLUIDES NUMÉRIQUE

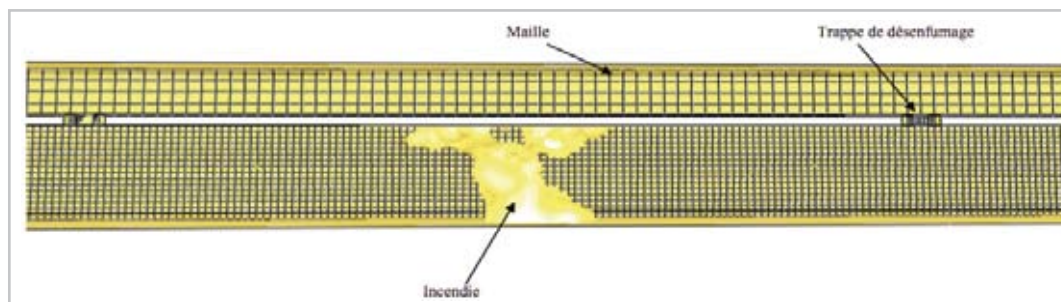
Les équations résolues dans un code de mécanique des fluides sont les équations aux dérivées partielles de la mécanique des fluides^[6] : équation de conservation de la masse, trois équations de conservation de la quantité de mouvement et une équation d'énergie, indispensable pour la modélisation des incendies.

La complexité de ces équations rend leur résolution algébrique impossible et impose l'utilisation d'une discrétisation de l'espace et du temps.

Les équations sont ainsi résolues sur de petits volumes, appelés mailles, tel que représenté sur la figure 1.

Cette figure montre une représentation numérique de la galerie incendie de l'INERIS (10 m² de section et une longueur de 50 m) en configuration de ventilation semi-transversale, c'est-à-dire avec une gaine d'air vicié en partie haute permettant d'extraire les fumées au travers des trappes de désenfumage. De la même manière, une discrétisation temporelle est utilisée.

Par ailleurs, la résolution exacte de ces équations discrétisées est impossible et l'utilisation de sous-modèles est alors nécessaire et, plus particulièrement dans le domaine de l'incendie, des modèles



► Exemple de maillage sur une géométrie « tunnel ». Dans le cas présent, la galerie incendie de l'INERIS.

de combustion et de turbulence. La complexité et la large variété des modèles de combustion empêchent d'en faire ici une description satisfaisante. Les références [5] et [6] présentent respectivement le modèle de combustion utilisé dans le code FDS et une vue générale des modèles de combustion.

Modélisation des phénomènes turbulents

Les phénomènes turbulents sont des phénomènes instationnaires, généralement anisotropes, et plus particulièrement pour les tunnels qui présentent une direction d'écoulement privilégiée. De manière simple et imagée, on retiendra la turbulence comme un ensemble de structures tourbillonnaires, de tailles variant entre l'échelle de Kolmogorov pour les plus petites structures et l'échelle intégrale pour ceux de tailles les plus importantes, ou plus exactement pour les tourbillons les plus énergétiques. Trois niveaux de modélisations de la turbulence peuvent être utilisés.

Le niveau de résolution exacte des phénomènes turbulents est appelée **DNS** (pour l'acronyme anglais **Direct Numerical Simulation**). Il s'agit, dans ce cas, d'utiliser un maillage suffisamment fin pour capturer l'ensemble des structures de l'écoulement, c'est-à-dire des mailles de la taille de l'échelle de Kolmogorov. Le nombre de mailles qu'il est alors nécessaire d'utiliser est souvent rédhibitoire pour les simulations de configurations réelles. Cette famille de modèles est à l'inverse très pertinente pour modéliser des petits domaines afin de comprendre les phénomènes physiques plus en détail et d'écrire des modèles pour les autres approches.

Afin d'utiliser des maillages exploitables sur des configurations réelles et industrielles, il faut se résoudre à ne pas capturer l'ensemble des phénomènes physiques. Dans le cas des modèles **LES** (pour l'acronyme anglais **Large Eddy Simulation**), les équations sont filtrées spatialement : les plus grandes échelles de la turbulence, soient les tourbillons les plus énergétiques sont résolus numériquement, les plus petites échelles sont

modélisées physiquement. Ces modèles permettent notamment de capturer des phénomènes fortement instationnaires car aucune moyenne temporelle n'est utilisée. À l'inverse, pour les modèles de type **RANS** (pour **Reynolds Average Navier Stokes**) les équations sont moyennées temporellement, cela signifie que l'écoulement moyen est résolu, les phénomènes turbulents sont modélisés, par exemple au moyen d'un transport d'équations supplémentaires (modèle k- ϵ par exemple).

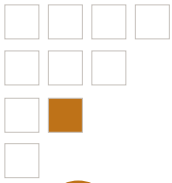
Comme spécifié précédemment, pour les modélisations 3D en tunnel, l'INERIS se sert du code FDS. Ce code utilise, pour modéliser les phénomènes turbulents, une approche de type LES. Plus de détails sur ces méthodes de résolution de la turbulence sont présentés dans [5] et [7].

TUNNELS ET VENTILATION

La réglementation, et plus particulièrement la circulaire interministérielle n°2000-63 du 25 août 2000, impose la mise en place d'une ventilation, notamment pour le désenfumage, pour les tunnels routiers. Plusieurs familles de systèmes de ventilation peuvent être utilisés :

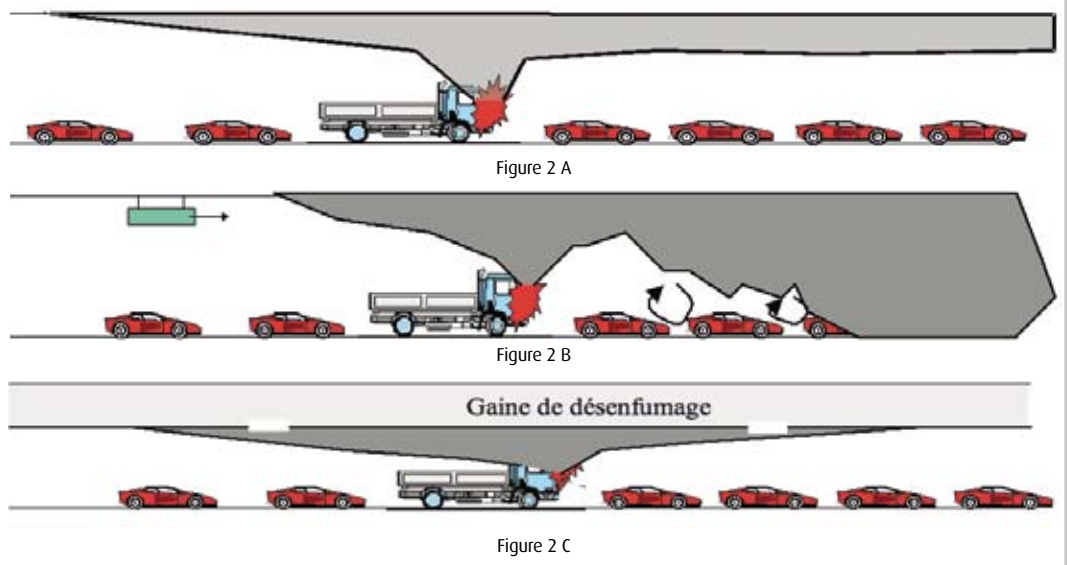
- Ventilation longitudinale ;
- Ventilation transversale ou semi-transversale.

La ventilation longitudinale d'un tunnel consiste à créer un courant d'air sur toute la longueur du tunnel (ou par tronçons) par extraction ou injection d'air. Ce procédé utilise généralement des ventilateurs longitudinaux, ou accélérateurs, situés sous la voûte du tunnel. Le procédé est représenté sur la figure 2A. On distingue sur ce schéma les deux zones caractéristiques d'une ventilation longitudinale : la couche de fumée à l'aval du feu, c'est-à-dire dans le sens de l'écoulement dont la stratification est délicate à tenir, et la couche remontant l'écoulement, généralement stable, appelé backlayering. La formule de Danziger et Kennedy [9] permet d'évaluer la vitesse nécessaire, appelée vitesse critique, pour empêcher les fumées d'envahir la partie amont du tunnel. Cependant, des phénomènes physiques, comme l'impact d'un accélérateur situé en amont, peu-



#2

- > A : Principe de la ventilation longitudinale.
- > B : Perturbation induite par les véhicules sur la nappe aval en ventilation longitudinale.
- > C : Principe de la ventilation transversale.



vent engendrer la déstratification de cette nappe de fumée, dont les conséquences peuvent être dramatiques. Il convient ainsi de bien appréhender les phénomènes physiques liés à ce phénomène. Par ailleurs, un modèle CFD peut permettre d'appréhender la turbulence générée par les véhicules stationnés en aval de l'incendie, turbulence dont les conséquences peuvent être une perte de stabilité plus rapide de la nappe aval, figure 2B. La ventilation transversale ou semi-transversale consiste à utiliser une gaine d'extraction d'air vicié (semi-transversale), couplée à une gaine d'apport d'air frais pour la ventilation transversale. Ce principe de fonctionnement est représenté sur la figure 2C. Dans le cas d'une ventilation semi-transversale, l'écoulement est symétrique par rapport au feu, la vitesse dans la zone de l'incendie est très faible. L'air frais est apporté par les deux entrées du tunnel et l'air vicié extrait par la gaine de désenfumage. Ce schéma de ventilation permet généralement de conserver une nappe stratifiée en partie haute mais la longueur du tunnel où se répartissent les fumées et cette stabilité sont à quantifier ; cela peut être réalisé à l'aide d'outils de calcul 3D. De

même, la turbulence générée par les véhicules et son impact sur la stabilité de la nappe de fumée sont à étudier. Cette configuration sera également étudiée expérimentalement dans le cadre du projet EGSISTES afin de déterminer l'influence d'obstacles, tels les véhicules, sur la stratification des fumées. Les modèles importants pour la modélisation des écoulements dans les tunnels sont donc les modèles de combustion, de turbulence, les phénomènes pouvant être à l'origine de la déstratification d'une nappe de fumée et les modèles thermiques utilisés pour calculer les échanges aux parois.

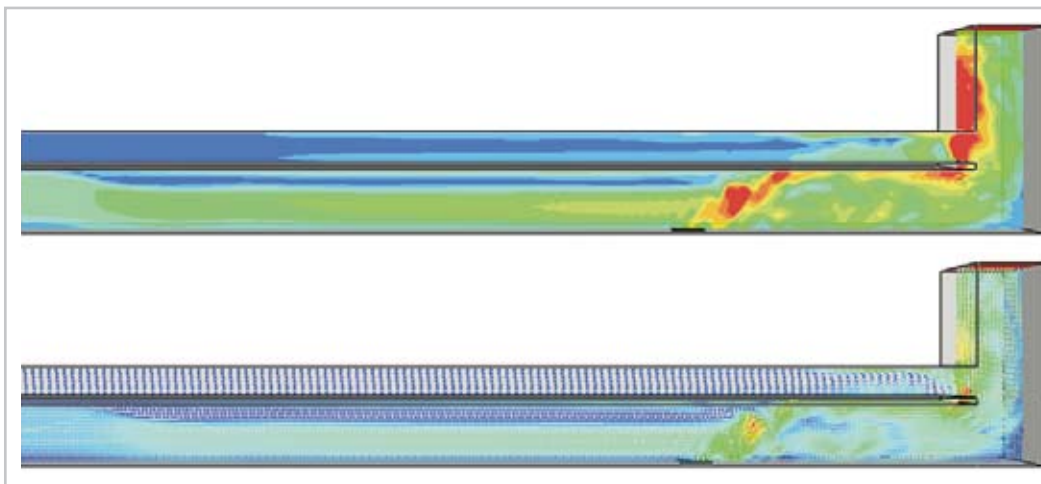
MODÉLISATIONS CFD DANS LE CADRE DU PROJET EGSISTES

Ce chapitre montre brièvement les résultats obtenus à l'aide d'un calcul CFD et les exploitations qu'il est possible d'en faire. La figure 3 montre une iso-surface de dégagement d'énergie et la nappe de fumées obtenues pour deux couples régime de ventilation – puissance. La figure 4 montre le champ de vitesse sous forme d'iso-contours et de champ de vecteurs. Ces résultats permettent, dans

#3

- > Visualisation du dégagement d'énergie (iso-surface orange) et du nuage de fumée dans une configuration de ventilation longitudinale pour deux couples régimes de ventilation - puissance.





> Champ de vitesse.

le cas du projet de recherche EGSISTES, de définir les conditions expérimentales les plus pertinentes. Les vitesses d'air sont comparées à la vitesse critique théorique donnée par la formule de Danziger et Kennedy^[9].

CONCLUSIONS

Les moyens de calcul CFD sont de précieux outils dont les usages sont nombreux. En premier lieu, comme présenté dans ce document, ils permettent de déterminer les distributions des différentes grandeurs physiques et notamment, pour la problématique des incendies en tunnels, les températures, champs de concentration ou encore

distributions de vitesse. Ces outils sont couramment utilisés dans les études spécifiques de dangers en tunnel afin de valider la mise en œuvre de certaines hypothèses et vérifier les principes clés de la sécurité. Par ailleurs, il s'agit d'outils de recherche précieux. Ils permettent de comprendre les phénomènes physiques en modélisant de nombreuses configurations qu'il serait impossible d'étudier expérimentalement. Cependant, la complexité et la finesse des modèles utilisés implique une forte attention dans la validation des outils et l'exploitation des résultats. On mentionnera, par ailleurs, la sensibilité aux paramètres d'entrée et l'importance d'essais permettant l'exploitation.

[RÉFÉRENCES

- [1] Daëron S., Ruffin E., 2000. *Calculations of fire smoke behaviour in long rail tunnels*. 1st international Conference « tunnels and Underground Station Fires », 3-4 May 2000, Hong Kong.
- [2] Ruffin E., 2001. *Mise au point d'un outil de simulation de situations accidentelles en réseaux souterrains*. Rapport INERIS 25-BCRD-97, juin 2001.
- [3] Waymel F., Fournier L., Ruffin E., 2005. *Étude numérique de l'influence des véhicules sur la stratification des fumées d'incendie en tunnel*. Congrès AFTES, les tunnels, clé d'une Europe durable, 10-12 octobre 2005, Chambéry, France.
- [4] Boehm M., Fournier L., Truchot B., 2008. *Smoke stratification stability: Presentation of experiments*. Tunnel safety and Ventilation, 21-23 avril 2008, Graz.
- [5] « *Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide* ». March 2007. NIST.
- [6] Candel S., 2001. « *Mécanique des fluides* ».
- [7] Sagaut P., 2002. *Large Eddy Simulation for Incompressible Flow, An introduction*. Second edition.
- [8] Poinso T. et Veynante D., 2005. *Theoretical and numerical combustion*. Second edition.
- [9] Danziger N. and Kennedy W., 1982. *Longitudinal ventilation analysis for the Glenwood Canyon tunnels*. Int. Symp. on the aerodynamics and ventilation vehicle tunnels », p. 169-186.

□ □ ■ SUMMARY

This paper presents one part of the EGSISTES research project. This project is linked with the recent accidents that occurred in some tunnels. More especially, one of the aims of this project is to define the answer of a stratified smoke layer to an external disturbance such as fan or vehicle presence. This will be done using both experimental and numerical approaches. The objective of this paper is to describe the relations between fire and ventilation modelling which is the key point for the stratification understanding.

One of the main phenomena responsible of the stratification disturbance is turbulence with can be modelled following three main approaches: RANS, LES and DNS. Those three approaches are described in the paper. LES simulations are presented next because the FDS code used by INERIS is based on this approach. This approach is the best compromise between the instationary phenomena modelling and the computing possibilities.

The basic principles of ventilation in road tunnels are described next: transversal and longitudinal ventilation strategy. Both approaches have to be applied following a strict regulation in France. The first consists in blowing smoke outside the tunnel using one part of this tunnel the second one required a ventilation duct for smokes extraction.

Finally, FDS computations reproduce experiments that are achieved in the INERIS fire tunnel with a one third scale. Those experiments aim first to have a better characterisation of the stratified smoke layer.