

IV. METHODES D'ETUDE

IV.1 Introduction

L'importance des enjeux humains et économiques liés aux incendies dans les tunnels justifie des recherches spécifiques, dont les deux principaux buts peuvent être classés comme suit :

- **stratégies de sécurité** : les investigations couvrent généralement l'évaluation de l'opacité, les concentrations en gaz toxiques, la vitesse de l'air, le mouvement des fumées, etc. ; les résultats de ces recherches concernent les débits de ventilation, l'organisation géométrique des débits, les itinéraires de secours ou les possibilités d'intervention des pompiers ;
- **influence de l'incendie sur la structure et les équipements du tunnel** : la chaleur dégagée par l'incendie peut endommager les murs et le plafond ; la situation peut devenir dangereuse dans le cas d'un tunnel immergé ou de conduites de ventilation situées en plafond ; l'incendie peut également causer de sérieux dommages aux équipements, et tout spécialement au système de ventilation.

Puisque dans un tunnel, la capacité de ventilation est le seul paramètre capable de contrecarrer les effets d'un incendie, le contrôle de la vitesse longitudinale de l'air apparaît très souvent comme le dénominateur commun de toutes ces études.

Les moyens utilisés dans de telles études impliquent différentes méthodes (expérimentales ou numériques) et leur importance peut considérablement varier d'une étude à l'autre. Ces études sont généralement réalisées pour des projets spécifiques de tunnel ou pour préparer des recommandations ou des réglementations. De nombreux résultats expérimentaux et théoriques ont été obtenus ; la plupart d'entre eux sont d'un grand intérêt. Les méthodes étant nombreuses, avec des coûts, validités et résultats différents, il n'est pas toujours aisé de repérer quel type d'approche est le plus approprié pour un problème donné. Un panorama général de ces études a donc semblé nécessaire pour classer les méthodes disponibles selon leur intérêt spécifique, et recommander le meilleur usage à faire de chacune.

Trois familles de méthodes ont été distinguées : essais en vraie grandeur, essais à échelle réduite et simulations numériques. Leur présentation successive sera suivie de conclusions générales.

IV.2 Travaux antérieurs de l'AIPCR

Ces quinze dernières années, le Comité AIPCR des Tunnels routiers a toujours étudié la question de la sécurité incendie et a présenté, dans ses différents rapports, soit un état de l'art, soit des recommandations.

Néanmoins, il y a peu d'informations concernant les méthodes d'étude, hormis les importants essais en vraie grandeur réalisés en Suisse (Ofenegg 1965), au Japon (Futatsugoya 1968-1969, Amikake 1975, PWRI 1980) et Autriche (Zwenberg 1974-1975). Ces essais ont servi à l'AIPCR pour élaborer des recommandations dans les rapports aux Congrès de Vienne (1979) [26] et de Bruxelles (1987) [19].

IV. STUDY METHODS

IV.1 Introduction

The human and economic stakes associated to fires in tunnels require specific investigations. The two main aims of such studies may be classified as follows:

- **Safety strategies:** the investigations generally deal with the evaluation of opacity, toxic gases concentrations, air velocity fields, smoke movement, etc. Their results concern the definition of the ventilation rates, the geometric organisation of the flow rates, the emergency routes or the possibilities for fire brigades intervention.
- **Influence of the fire on the tunnel structure and equipment:** the walls and ceilings may suffer from the heat released by the fire. The situation may be dangerous in the case of an immersed structure or in the case of air ducts located above the ceiling of the tunnel. The fire may also cause severe damage to the equipment, and especially to the ventilation system.

As in a tunnel the ventilation capacity is the only parameter able to counterbalance the effects of a fire, the control of the longitudinal air velocity often appears of common interest for all these studies.

The means used in such studies involve different methods (experimental or numerical) and their importance may significantly vary from one investigation to another. These studies are generally performed for specific tunnel projects or to prepare recommendations or regulations. Many experimental and theoretical developments have been performed and most of them are of great interest. With regard to such a number of methodologies with various costs, validity and results, it is not always obvious to know which kind of approach is best appropriate for a given problem. This is the reason why a general review of these studies seems to be necessary to classify the available methods according to their specific interest, and to recommend the best use of each one.

Three families of methods have been distinguished: full scale tests, small scale experiments and computer simulations. They will be examined successively before general conclusions are drawn.

IV.2 Previous work by PIARC

During the last 15 years, the PIARC Committee on Road Tunnels has always worked on the fire safety problem and has included either state of the art or recommendations in its different reports.

Nevertheless there are few indications concerning the study methods, except the use of large scale fire tests which have been carried out in Switzerland (Ofenegg 1965), Japan (Futatsugoya 1968-69, Amikake 1975; PWRI 1980) and Austria (Zwenberg 1974-75). These fire tests have been used by PIARC for setting up their recommendations in the Vienna (1979) [26] and Brussels (1987) [19] reports.

Les principales recommandations de l'AIPCR, directement liées aux méthodes d'étude, ont été publiées dans le rapport de Bruxelles et, plus récemment, dans le rapport de Montréal [17].

Le rapport de Bruxelles [19] définit trois catégories d'incendies de véhicules de dimensionnement (voiture particulière, autobus ou camion, marchandises dangereuses) et donne, pour chacune d'elles, des caractéristiques relatives à la source de l'incendie (puissance thermique et production de fumée maximales) et l'extension de la couche de fumée sous deux conditions de ventilation (vitesse faible et vitesse critique, qui est la vitesse longitudinale minimale de l'air capable d'éviter le mouvement à contre-courant, ou remontée, de la fumée). Ces recommandations sont fondées sur les résultats des importants essais en vraie grandeur mentionnés précédemment et ont été utilisées de par le monde en vue de la définition des incendies de dimensionnement pour les systèmes de désenfumage. Le rapport de Bruxelles présente également les simulations numériques comme une nouvelle méthode de prévision d'une situation d'incendie dans un tunnel. Il est dit que "*les outils informatiques permettent d'utiliser la modélisation mathématique pour comprendre les incendies dans les tunnels. Cela permet de mieux connaître l'influence de nombreux paramètres et donc, de réserver les essais en vraie grandeur au calibrage des modèles*".

Le rapport de Montréal [17] donne de nouvelles recommandations et les grandes lignes des thèmes développés dans le présent rapport.

IV.3 Essais en vraie grandeur

IV.3.1 Grands programmes de recherche

IV.3.1.1 Objectifs

Les programmes de recherche utilisant des installations en vraie grandeur traitent généralement de nombreux aspects spécifiques de la sécurité caractérisés par d'importants enjeux humains et économiques.

IV.3.1.2 Moyens

Ces programmes expérimentaux sont généralement menés dans des tunnels désaffectés et requièrent d'importants moyens financiers.

Les principaux programmes déjà réalisés sont les suivants :

- **tunnel de l'Ofenegg** (Suisse, 1965) [59] : ces essais furent conduits afin d'étudier les capacités de la ventilation en cas d'incendie, dans le cadre des grands projets suisses des années soixante. L'installation était un tunnel ferroviaire se terminant en cul-de-sac à 190 m de la tête. Environ onze incendies furent provoqués à l'aide de bacs d'essence de 6,6 m² à 95 m². Les mesures portèrent sur la température, la vitesse de l'air, les concentrations en gaz (CO et O₂) et la visibilité.
- **tunnel du Zwenberg** (Autriche, 1975) [60] : ce programme fut décidé en liaison avec deux importants projets d'autoroutes en Autriche. Les systèmes de ventilation longitudinale et semi-transversale furent testés. Les essais portèrent sur un total de 30 bacs d'essence. Les surfaces d'essence enflammée étaient de 6,8 m² et 13,6 m². Les mesures portèrent sur la température, les concentrations en gaz (CO, CO₂, NO_x, O₂), l'opacité et le taux de combustion.

The major PIARC recommendations which are directly connected with the “study methods” have been published in the Brussels report and more recently in the Montreal report [17].

The Brussels report [19] defines three types of design road vehicle fires (private car, bus or truck, dangerous goods) and gives for each one some characteristics on the fire source itself (maximum heat release rate and smoke production) and the spread of the smoke layer under two ventilation conditions (low velocity and critical velocity - which is the minimum longitudinal airflow velocity able to avoid the backward propagation, or backlayering, of the smoke). These recommendations are based on the results of the large fire tests mentioned previously and have been used world-wide to define the design fire for smoke control systems. The Brussels report also mentions the computer simulations as a new method for predicting fire situation in a tunnel. It is said that "*computer facilities also allow fire problems in a road tunnel to be solved on the basis of mathematical modelling. This will give further insight on the influence of many parameters, so that full scale tests must only be made to calibrate the mathematical models*".

The Montreal report [17] gives new updated recommendations and outlines the topics developed in the present report.

IV.3 Full scale tests

IV.3.1 Large research programmes

IV.3.1.1 Objectives

Research programmes using full scale facilities generally deal with numerous but very specific aspects of safety characterised by high human and economic stakes.

IV.3.1.2 Means

These experimental programmes are usually held in disused tunnels. They require important financial means.

The main programmes performed in the past are the following:

- **Ofenegg tunnel** (Switzerland, 1965) [59]: these tests were carried out in order to study the ventilation capacities in the case of a fire under the large Swiss tunnel projects of the sixties. The facility was a railway tunnel with a dead end located 190 m from the portal. About 11 fires were performed using petrol pools from 6.6 m² to 95 m². The measurements concerned temperature, air velocity, gas concentrations (CO and O₂) and visibility.
- **Zwenberg tunnel** (Austria, 1975) [60]: this programme was decided in connection with two major motorways projects in Austria. Longitudinal and semi-transverse ventilation systems were tested. The tests concerned a total of 30 pool fires. The ignited petrol areas were 6.8 m² and 13.6 m². The performed measurements were: temperature, gas concentration (CO, CO₂, NO_x, O₂), opacity and combustion rate.

- **expériences PWRI** (Japon, 1980) [61] : les essais japonais en vraie grandeur utilisèrent une galerie de 700 m de long construite par l'Institut de Recherche des Travaux publics (PWRI) et un tunnel de 3 300 m de long. Seize expérimentations furent réalisées dans la galerie et huit dans le tunnel. On utilisa comme foyers des bacs d'essence (dix essais avec 4 m², deux essais avec 6 m²), des véhicules particuliers (six essais) et des autobus (six essais). Les conditions physiques mesurées dans le tunnel furent corrélées aux capacités de secours. L'influence de la vitesse longitudinale de l'air fut démontrée.
- **tunnel de Repparfjord** (Norvège, 1990-1992) [62] : ces essais furent conduits dans une ancienne galerie minière d'une longueur de 2,3 km (parois non revêtues et section transversale allant de 30 à 40 m²). Ils rassemblèrent neuf pays européens et



constituèrent la base du projet EUREKA 499 "Firetun". Un total de 21 essais fut mené sur des wagons de train et de métro, des véhicules particuliers, des poids lourds et des feux calibrés (bacs d'heptane et palettes en bois). Près de 400 capteurs furent installés le long du tunnel et à l'intérieur des foyers. Les mesures portaient sur la température de l'air et des parois, la vitesse, l'opacité, la concentration des gaz, le mouvement des fumées (par vidéo), etc.

Photo 4.3.1 - Essai d'incendie dans le tunnel de Repparfjord

Photo 4.3.1 - Fire test in Repparfjord tunnel

- **Memorial tunnel** (États-Unis, 1993-1995) [63] : ce programme fut financé par la *Federal Highway Administration* et l'État du Massachusetts pour le projet de tunnel/artère centrale de Boston. Les expériences furent réalisées dans un tunnel routier désaffecté de 850 m de long en Virginie occidentale. Près de 91 essais furent menés avec des bacs de gasole. Les puissances thermiques obtenues variaient de 10 MW (4,5 m²) à 100 MW (44,4 m²). Les systèmes de ventilation transversale et longitudinale furent testés. 1 450 capteurs furent installés dans le tunnel, fournissant ainsi près de 4 millions de données par essai.

Les récents programmes de recherche sont fondés sur des systèmes complets de mesures. Les capteurs sont nombreux et sont organisés en réseaux tout à fait semblables à ceux utilisés dans les simulations numériques par modèle de champ.

- **PWRI experiments** (Japan, 1980) [61]: the Japanese full scale test programmes used a 700 m long gallery built by the Public Works Research Institute (PWRI) and a 3300 m long road tunnel. 16 experiments were performed in the gallery and 8 in the tunnel. The fire sources were fuel pools (10 tests with 4 m², 2 tests with 6 m²), passenger cars (6 tests) and buses (6 tests). The physical conditions measured in the tunnel during the fires were connected with the emergency capacities. The influence of the longitudinal airflow velocity was shown.
- **Repparfjord tunnel** (Norway, 1990-1992) [62]: these experiments were performed in an abandoned 2.3 km long mining gallery (rough wall surfaces and cross-section varying from 30 to 40 m²). They gathered 9 European countries (these experiments were the base of the EUREKA 499 "Firetun" project). A total of 21 tests were performed using rail and metro vehicles, passenger cars, heavy goods vehicles and calibrated fires (heptane pools and wood cribs). About 400 captors were installed along the tunnel and inside the fire loads. The measurements dealt with air and wall temperature, velocity, opacity, gases concentration, smoke motion (video network), etc.
- **Memorial tunnel** (USA, 1993-1995) [63]: this programme was financed by the Federal Highway Administration and the Commonwealth of Massachusetts for the Boston Central Artery Tunnel project. The experiments were performed in an abandoned 850 m long road tunnel located in West Virginia. About 91 tests were

performed with diesel oil pool fires. The obtained heat release rates vary from 10 MW (4.5 m²) to 100 MW (44.4 m²). The transverse and longitudinal ventilation configurations were tested. 1450 captors were installed in the tunnel, providing about 4 millions data per experiment.

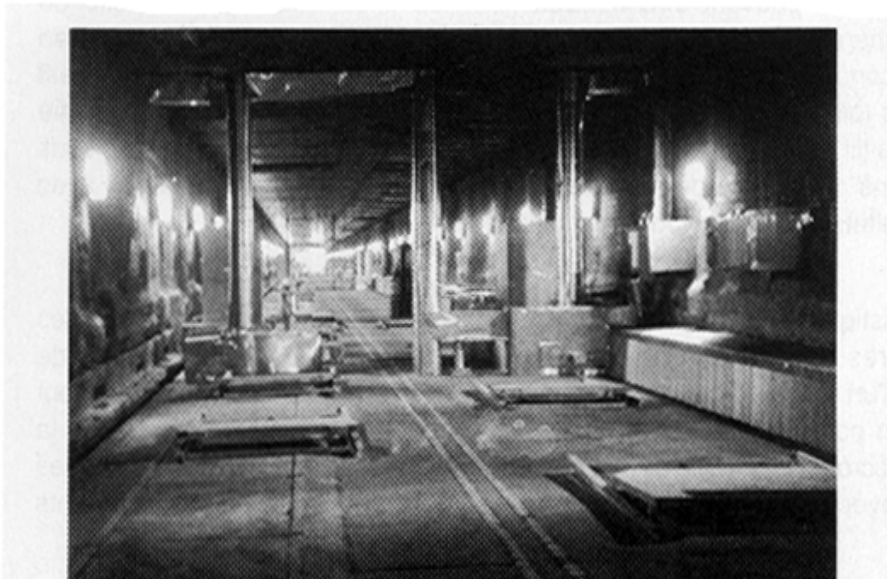
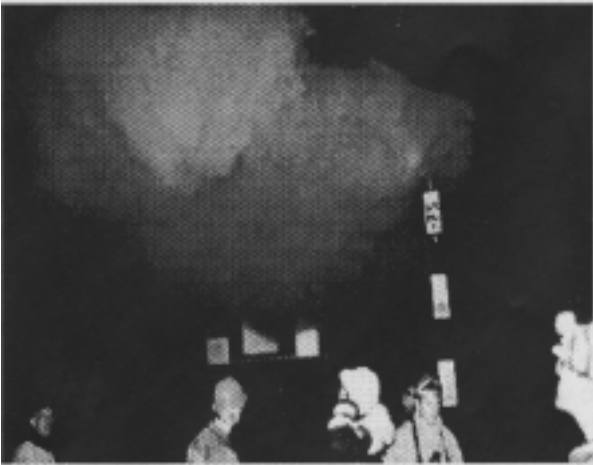


Photo 4.3.2 - Measuring equipment in the Memorial tunnel

Photo 4.3.2 - Équipement de mesure dans le Memorial tunnel

The recent research programmes are based on complete measurement systems. The captors are numerous and they are organised in networks quite similar to the mesh used in CFD models.

IV.3.1.3 Résultats



L'une des caractéristiques de ces expériences est qu'il n'y a pas d'accès au site de l'incendie. Aucune observation visuelle n'est possible (sauf si une caméra vidéo est installée sur le site). Dans certains cas, les opérateurs pouvaient être présents dans les sections situées en amont de l'incendie (figure 4.3.1). Cet emplacement ne peut permettre une vue d'ensemble de l'expérience.

Figure 4.3.1 – Front de la remontée de fumée lors d'un essai avec un wagon de métro (EUREKA 499)

Figure 4.3.1 - Front of backlayering during a rail vehicle experiment in EUREKA 499

Dans ces conditions, le grand nombre de données recueillies est utile pour construire des interprétations concernant les phénomènes se développant lors d'un incendie (figure 4.3.2). La localisation des capteurs sur un maillage 3D apparaît fondamentale pour l'analyse.

Si certains phénomènes peuvent être correctement identifiés, il est plus difficile de déduire des lois générales à partir des expériences en vraie grandeur. Cela est dû au peu d'expériences conduites dans chaque programme. Il faut noter que leur objectif n'est pas d'aboutir à des lois générales. Par exemple, les essais japonais ont été en partie réalisés pour recueillir des informations qualitatives sur les sorties de secours sous différentes conditions de vitesse de l'air. Ce but ne semble pas être compatible avec l'utilisation des résultats dans des modèles scientifiques.

L'une des caractéristiques des essais EUREKA 499 est l'utilisation de vrais véhicules routiers et ferroviaires comme charge combustible. Comme la puissance thermique de tels incendies est l'un des paramètres du risque encore inconnus, les opérateurs ont saisi cette occasion pour réaliser les mesures correspondantes. Le confinement de la chaleur semblait accroître les taux de combustion. En réalité, les interprétations des résultats obtenus avec des méthodes différentes conduisent à des résultats différents [65].

En raison des incertitudes des résultats de mesure, les interprétations concluent généralement que la puissance thermique calculée est liée à la méthode utilisée pour son évaluation. Néanmoins, certaines des conclusions tirées des essais sur les incendies de poids lourds (essai EUROTUNNEL) semblent en relative contradiction avec les informations disponibles dans les précédentes recommandations de l'AIPCR. Dans le rapport de Bruxelles [19], on mentionnait 20 MW pour la puissance thermique d'un poids lourd en flammes. Les résultats EUREKA montrent des valeurs plus élevées : certaines dépassent 100 MW pendant quelques minutes.

IV.3.1.3 Results

One of the characteristics of these experiments is the fact that no access is possible in the fire area. No visual observation is then possible (except when a video camera is installed in that zone). In some cases, operators could be present in the sections located upstream from the fire (Figure 4.3.1). This situation cannot provide an overview of the experiment.

In these conditions, the great number of recorded data is helpful to build interpretations concerning the phenomena developed during the fire (Figure 4.3.2). The location of the captors on 3D mesh appears fundamental for this analysis work.

If some phenomena can be correctly identified, it is more difficult to deduce general laws from the full scale experiments. This is due to the relatively low number of experiments performed in each programme. It is to be noticed that their aim is not the research of such relations. For example, the Japanese tests were partly planned to give qualitative information about the escape routes in different air velocity control conditions. This target does not appear to be compatible with the use of the results in scientific models.

A characteristic of the EUREKA 499 experiments is the use of real road and rail vehicles as fire loads. As the heat release rate of such fires is one of the unanswered questions concerning the risks, the operators took this opportunity to perform the corresponding measurements. The heat confining seemed to increase the burning rates. Actually, the interpretations of results performed with different methods show different results [65].

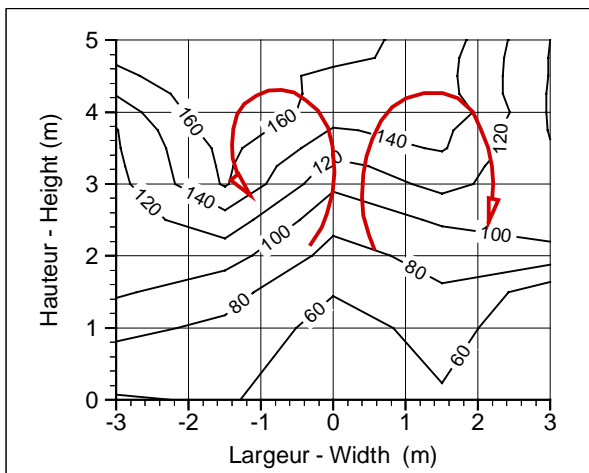


Figure 4.3.2 - Deux tourbillons (dus à la conjugaison de la force hydrostatique et de la traînée de l'incendie) peuvent être déduits des courbes isothermes calculées à partir des mesures (section transversale située à 20 m en aval de l'incendie lors de l'essai à l'heptane H32, EUREKA 499 [64])

Figure 4.3.2 - Two vortices (induced by the combination of buoyancy and fire drag effects) can be deduced from the isothermal curves calculated from the measurements (cross-section located 20 m downstream the fire in EUREKA 499 heptane test H32, [64])

Because of the uncertainties on the measurement results, the interpretations generally conclude that the calculated heat release rate is linked to the method used for its evaluation. Nevertheless, some of the conclusions drawn from the heavy goods vehicle fire (EUROTUNNEL test) appear in a relative opposition with the information available in previous PIARC recommendations. In the Brussels report [19], the heat release rate of a burning HGV was mentioned as 20 MW. The EUREKA results show higher peak values: some were found above 100 MW during a few minutes.

On ne peut cependant pas en conclure que le manque de similitude parfaite conduit à des résultats irréalistes. En effet, les conclusions tirées d'expériences à échelle réduite sur des navettes dans le tunnel sous la Manche ont ensuite été confirmées par des essais en vraie grandeur [70].

Une autre caractéristique de ces essais est le nombre relativement faible de capteurs installés sur la maquette. Cette situation peut se justifier par les deux raisons suivantes :

- un capteur placé à l'intérieur de la maquette peut perturber l'écoulement ;
- le but de ces essais n'est pas d'obtenir des informations précises sur la physique se développant à l'intérieur de la maquette, mais de caractériser des situations globales.

Une bonne solution consiste à placer les capteurs aux extrémités de la maquette pour obtenir des informations correctes sur les conditions limites.

IV.4.5 Conclusions et recommandations

Deux sortes d'études utilisant des maquettes à échelle réduite ont été présentées.

La représentation de situations réelles à l'aide de maquettes à échelle réduite dépend du nombre de lois de similitude prises en compte. Si un seul des paramètres est respecté (nombre de Froude ou de Richardson), la validité de ce type d'étude ne sera pas complètement obtenue. L'application de cette technique à des situations en vraie grandeur n'est pas immédiate. Par exemple, les conclusions tirées d'études sur des trappes d'aspiration [71] ont été appliquées à certains projets car elles fournissaient des réponses adéquates quant aux capacités relatives des différents systèmes ; mais les valeurs absolues n'ont pas été utilisées.

Le deuxième cas est l'utilisation des maquettes à échelle réduite pour la recherche. Les conclusions de telles études sont généralement limitées au cas étudié. La transposition des résultats à la vraie grandeur nécessite des expériences de référence. Ainsi, l'intérêt de ces maquettes est de montrer que des lois générales peuvent être tirées de l'étude de situations spécifiques ; ces maquettes donnent également la forme analytique de ces lois (par exemple, l'existence d'une remontée de fumée en fonction des caractéristiques de l'incendie et de la vitesse longitudinale de l'air).

D'une manière générale, la validité d'une expérience fondée sur l'utilisation d'une maquette est directement reliée à l'interprétation de la loi de similitude.

IV.5 Simulations numériques

IV.5.1 Généralités

Les difficultés et les limites des expérimentations physiques ont depuis fort longtemps conduit à étudier la manière dont le calcul pourrait remplacer l'essai ou, à tout le moins, servir à en généraliser les résultats.

Depuis les années quatre-vingts, on a de plus en plus recours à des simulations numériques pour étudier le comportement des incendies dans les tunnels [77]. Les principales raisons sont le développement très rapide de la capacité des ordinateurs et le coût raisonnable des calculs comparativement aux essais réels d'incendie. Ces simulations donnent également de nombreuses données détaillées qui ne pourraient pas être obtenues par d'autres moyens.

It is difficult to conclude that the lack of total similarity leads to unrealistic results. For example, the conclusions drawn from small scale experiments performed for the Channel Tunnel shuttles have been confirmed by full scale tests performed later [70].

Another characteristic of these experiments is the relatively low number of sensors installed in the model. Two main reasons can be mentioned to justify this situation:

- a sensor placed inside the model may disturb the flow;
- the aim of these experiments is not to get precise information about the physics that develop in the model, but to characterise global situations.

A good possibility is to place the sensors at the limits of the model so that they can give correct information about the boundary conditions.

IV.4.5 Conclusions and recommendations

Two kinds of studies using small scale models have been discussed.

The representation of realistic situations with reduced scale models depends on the number of similarity laws taken into account. As only one parameter is respected (Froude or Richardson number), the global validity of this kind of study is not completely respected. The application of this technique to full scale situations is not immediate. As an example, the conclusions drawn from the study dealing with trap doors [71] have been applied to projects because they provide valuable answers concerning the relative capacities of the various systems, but absolute results were not used.

The second case is the use of small scale models for research. The conclusions of such studies are generally limited to the studied model. The transposition of the established laws to full scale situations needs reference experiments. So, the interest of these models is to show that general laws can be drawn from the study of specific situations, and they give the analytic form for these laws (example: existence of backlayering vs source characteristics and longitudinal air velocity).

In a general manner, the validity of a study based on the use of models is directly linked to the interpretation of the similarity law.

IV.5 Computer simulations

IV.5.1 General

The difficulties and limitations of physical experimentation have long since led to study how calculation might replace testing, or at least generalise its results.

Computer simulations have become more and more popular to study fire behaviour in tunnels since the 80's [77]. The main reasons are the very fast development of computer capacities and the comparatively reasonable cost of the calculations compared to real fire tests. They also give many detailed data which are unattainable by other means.

IV.5.1.1 Simulations numériques par modèle de champ

L'outil le plus adéquat pour étudier les incendies de tunnel est actuellement la "simulation numérique par modèle de champ" (généralement désignée en anglais par CFD : *Computer Fluid Dynamics*). Cette technique consiste à diviser le tunnel en petites mailles à l'intérieur desquelles les équations fondamentales de la thermodynamique des fluides sont résolues au moyen de la méthode des éléments finis ou, plus souvent, des volumes finis. Les résultats obtenus dans chaque maille sont la vitesse de l'air, la température et la concentration de fumée.

La figure 4.5.1 montre le maillage longitudinal et transversal d'un modèle 3D qui représente un tunnel de 450 m de long, 6 m de large et 5,3 m de haut [78].

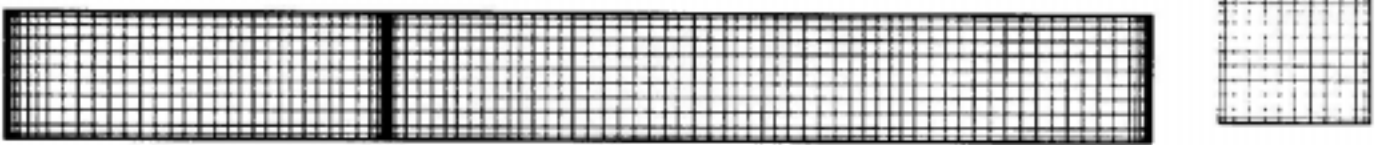


Figure 4.5.1 – Coupes longitudinale et transversale d'un maillage 3D

Figure 4.5.1 - Longitudinal and transversal views of a three-dimensional mesh

Ce chapitre traite principalement des simulations numériques par modèle de champ, bien qu'il existe d'autres simulations pouvant être utilisées pour étudier les incendies, comme les modèles de zone ou les modèles unidimensionnels.

IV.5.1.2 Modèles de zone

Ces modèles sont rarement utilisés pour étudier la propagation des fumées et de la chaleur dans les tunnels, mais ils sont couramment utilisés pour les bâtiments. Ils considèrent généralement une pièce ou un couloir comme une zone homogène où une couche d'air frais est surmontée par une couche de fumée, chacune d'elle ayant des caractéristiques constantes –y compris leur épaisseur- sur toute la zone. L'incendie, les échanges entre les couches et les zones voisines sont régis par des équations partiellement empiriques.

De tels modèles, relativement souples, peuvent être utilisés sur ordinateurs personnels et sont bien adaptés à l'étude du mouvement des fumées et de la chaleur dans un système complexe de salles communicantes. Malheureusement, ils ne sont pas bien adaptés à l'étude des incendies dans les tunnels, où la principale difficulté est de prévoir l'évolution du panache de fumée à l'intérieur d'une zone importante, en outre soumise à un courant d'air longitudinal, dont l'influence est prépondérante. Ces modèles ont donné lieu à peu de validations et leurs résultats ne semblent pas encore probants pour les incendies en tunnel.

IV.5.1.3 Modèles unidimensionnels

Les modèles unidimensionnels représentent un autre type d'outils destinés aux calculs transitoires des réseaux. Tout comme pour les simulations numériques par modèle de champ, les équations fondamentales de la thermodynamique des fluides sont résolues, mais une seule dimension est prise en compte. Cela signifie que toutes les conditions sont homogènes dans la section transversale.

IV.5.1.1 CFD models

At present the adequate tools for tunnel fires are the field models, also called Computational Fluid Dynamics (CFD) codes. This technique leads to divide the tunnel volume into small cells inside which the fundamental equations of fluid thermodynamics are solved using the finite elements method or, more frequently, the finite volumes method. The results are obtained in each cell. They concern air velocity, temperature, smoke concentration.

Figure 4.5.1 shows the longitudinal and transversal mesh of a three-dimensional model which corresponds to a tunnel 450 m long, 6 m wide and 5.3 m high [78].

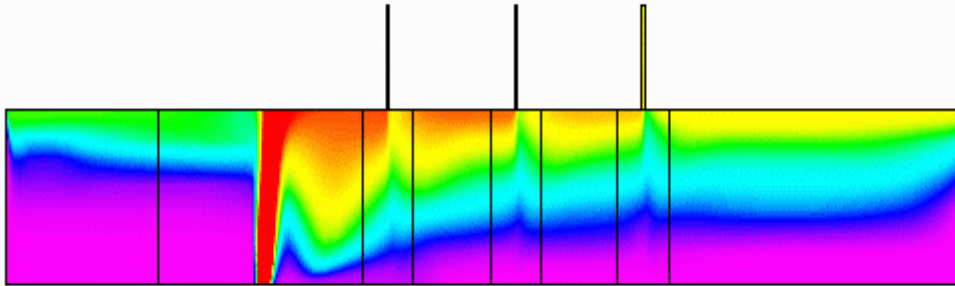


Figure 4.5.2 - Temperature field calculated with a CFD model for a tunnel with smoke exhaust shafts

Figure 4.5.2 - Champ de température calculé à l'aide d'un modèle de champ pour un tunnel doté de puits d'extraction

This chapter will be mainly focused on CFD codes, even though there are also other models which can be used to study fire situations in tunnel, as zone models or one-dimensional models.

IV.5.1.2 Zone models

Zone models are seldom used to study the spread of smoke and temperature in tunnels, but they are commonly used in buildings. They generally describe a room or a corridor as a homogeneous zone where a fresh air layer lies under a smoke layer, each of them having constant characteristics - including their thickness - on the whole zone. The fire, the exchanges between the layers and between the neighbouring zones are governed by partially empirical equations.

Such models - relatively flexible - can be investigated on a desk top computer and are well adapted to investigate the smoke and heat propagation in a complex system of communicating rooms. Unfortunately they are not well adapted to studying fires in tunnels, where the main problem is to predict the evolution of the smoke plume inside a large zone, moreover submitted to a longitudinal airflow, whose influence is determining. Few validations have been performed with such models and their success still seems uncertain for tunnel fires.

IV.5.1.3 One-dimensional models

One-dimensional models are another family of tools which are designed for the transient calculation of networks. As for CFD codes, the fundamental equations of fluid thermodynamics are solved, but only one dimension is considered. That means all the conditions are homogeneous in the cross-section.

Ces modèles ne peuvent être appliqués au voisinage de l'incendie puisqu'ils ne peuvent prendre en compte le phénomène de stratification. Cependant, leurs principes semblent suffisants pour l'étude des conditions loin du foyer de l'incendie dans un réseau routier souterrain ou un très long tunnel ; ils semblent également suffire pour définir les conditions limites des simulations numériques par modèle de champ, dans le cas où celles-ci ne modélisent pas le tunnel dans sa totalité.

IV.5.2 Directives et expérience existantes

Les simulations numériques sont réalisées à l'aide de codes par modèle de champ. En raison du développement de l'informatique, il a semblé intéressant d'adapter ces outils à l'analyse du risque incendie dans les tunnels. Un questionnaire a été expédié à tous les membres du groupe de travail en charge de ce rapport afin d'évaluer l'état de l'art dans différents pays sur la modélisation des incendies dans les tunnels. Un résumé des réponses au questionnaire est présenté dans ce paragraphe. Une liste de codes utilisés par les différents pays est donnée au tableau 4.5.1 ; cette liste n'est, bien évidemment, pas exhaustive, mais elle donne un aperçu de la situation en 1993.

Tableau 4.5.1 – Exemples de programmes numériques utilisés dans différents pays (1993)

Type de codes	Nom des codes	Auteurs	Utilisateurs	Remarques
Modèles unidimensionnels	VENDIS-FS	INERIS, France	INERIS, France	
	MFIRE	US Bureau of Mines, États-Unis	VTT, Finlande	
	SES	Parsons Brinckerhoff, États-Unis	Parsons Brinckerhoff, États-Unis	
Modèles de zone	TUNNEL	TNO, Pays-Bas	TNO, Pays-Bas	Plus du tout utilisés (1988)
	BRI2	BRI, Japon	VTT, Finlande	
	FAST	NIST, États-Unis	NIST, États-Unis	Non utilisés dans les tunnels
	FASIT	University of Leeds, Royaume-Uni	University of Leeds, Royaume-Uni	
	CIFI	CSTB, France	CSTB, France	Utilisés pour les bâtiments
Modèles de champ 2D & 3D	VESTA	TNO, Pays-Bas	TNO, Pays-Bas	En cours de développement
	CHAMPION		Delft Univ. Techn, Pays-Bas	Plus du tout utilisés
	PHOENICS	CHAM, Royaume-Uni	Univ. Graz, Autriche INERIS, France VTT, Finlande	
	JASMINE	CHAM & FRS, Royaume-Uni	Fire Research Station, Royaume-Uni Univ. Lund, Suède	Développés sur la base de PHOENICS
	FLOW3D	Atomic Energy Authority, Royaume-Uni	AEA Consultant, Royaume-Uni HSE, Royaume-Uni Mott Mac Donald, Royaume-Uni CETU, France Univ. Graz, Autriche	
	FLUENT	Fluent Inc, États-Unis	FOA, Suède	
	STORM	ADAPTIVE, États-Unis	SCETAUROUTE, France	
	FIRR	AVI, Autriche	Univ. Graz, Autriche	
	FURNACE	Australie	Univ. Sydney, Australie	

As they cannot take the layering phenomena into account, they cannot be applied in the fire vicinity. Nevertheless these principles seem sufficient for studying the conditions far from the source in an underground road network or a very long tunnel, and for providing boundary conditions to a CFD code in the case where the whole tunnel is not modelled by this latter model.

IV.5.2 Existing guidelines and experience

The numerical simulations are performed with CFD codes. Due to the computers development, it has been interesting to get an adaptation of these tools to fire risk analysis in tunnels. A questionnaire has been sent to all the members of the PIARC Working Group in charge of this report in order to evaluate the state of the art in different countries about the modelling of fire in road tunnels. This paragraph summarises the answers given to this questionnaire. A list of codes used in the different countries is presented in table 4.5.1; it is surely not exhaustive but gives an overview of the situation in 1993.

Table 4.5.1 - Examples of numerical programs used in different countries (1993)

Type of codes	Name of codes	Authors	Users	Remarks
1D models	VENDIS-FS	INERIS, France	INERIS, France	
	MFIRE	US Bureau of Mines, USA	VTT, Finland	
	SES	Parsons Brinckerhoff, USA	Parsons Brinckerhoff, USA	
Zone models	TUNNEL	TNO, NL	TNO, NL	Out of use (1988)
	BRI2	BRI, Japan	VTT, Finland	
	FAST	NIST, USA	NIST, USA	Not used in tunnels
	FASIT	University of Leeds, UK	University of Leeds, UK	
	CIFI	CSTB, France	CSTB, France	Used in buildings
CFD codes 2D & 3D	VESTA	TNO, NL	TNO, NL	Under development
	CHAMPION		Delft Univ. Techn, NL	Out of use
	PHOENICS	CHAM, UK	Univ. Graz, Austria INERIS, France VTT, Finland	
	JASMINE	CHAM & FRS, UK	Fire Research Station, UK Univ. Lund, Sweden	Developed on the base of PHOENICS
	FLOW3D	Atomic Energy Authority, UK	AEA Consultant, UK HSE, UK Mott Mac Donald, UK CETU, France Univ. Graz, Austria	
	FLUENT	Fluent Inc, USA	FOA, Sweden	
	STORM	ADAPTIVE, USA	SCETAUROUTE, France	
	FIRR	AVI, Austria	Univ. Graz, Austria	
FURNACE	Australia	Univ. Sydney, Australia		

Les réponses font apparaître que les simulations numériques sont de plus en plus utilisées pour l'analyse du risque incendie. Plusieurs raisons expliquent ce phénomène : tout d'abord, la difficulté et le coût des expériences en vraie grandeur ; ensuite, la vaste gamme d'informations fournies par les simulations numériques ; enfin, le développement de différents codes et les nouvelles performances des ordinateurs qui permettent de réaliser des calculs importants et complexes en un temps raisonnable.

Les utilisateurs des codes sont généralement conscients que les simulations numériques peuvent conduire à des résultats irréalistes si aucune précaution n'est prise. Il existe donc un consensus sur le besoin d'une validation fondée sur des expériences réelles avant d'utiliser les simulations numériques pour la conception des systèmes de désenfumage. De plus, l'expérience des utilisateurs dans le domaine de la modélisation des incendies ne peut être négligée si l'on veut assurer la qualité des résultats.

La figure 4.5.3 donne quelques éléments de validation obtenus par le CETU sur les essais du tunnel de l'Ofenegg [79].

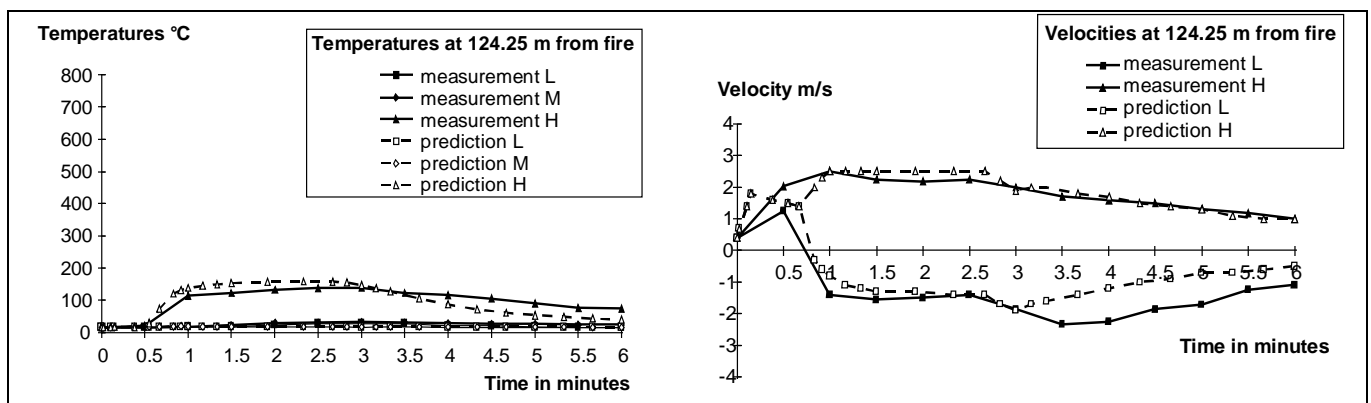


Figure 4.5.3 – Comparaison entre valeurs prévues et mesurées à la sortie du tunnel de l'Ofenegg

Malheureusement, peu d'essais en vraie grandeur réalisés de par le monde fournissent des mesures pouvant être utilisées pour valider les simulations numériques. D'une part, les essais ne sont pratiquement jamais effectués dans cet esprit. D'autre part, peu d'essais impliquent une grande gamme de conditions de ventilation (les essais du Memorial Tunnel peuvent à cet égard apporter des réponses intéressantes).

La durée du calcul peut apparaître comme une limite à la taille des modèles étudiés avec les modèles de champ. Généralement, les tunnels de plus de quelques centaines de mètres ne peuvent être modélisés en trois dimensions sur une station de travail. Par conséquent, quelques hypothèses doivent être faites pour fixer les conditions limites dans le cas où seulement une partie du tunnel est modélisée.

IV.5.3 Principes

Afin d'appréhender la complexité du problème, les équations fondamentales et les méthodes numériques sont succinctement présentées ci-après. Dans une première étape, si l'on considère l'écoulement transitoire et anisotherme d'un gaz considéré comme homogène, le problème consiste à déterminer six fonctions scalaires inconnues : les trois composantes u_x , u_y et u_z de la vitesse, la densité ρ , la pression p et la température T . Elles dépendent de quatre variables indépendantes : les trois variables d'espace x , y , z , et le temps t .

From all the available answers, it appears that CFD codes are more and more popular for fire risk analysis. Several reasons explain this evolution. The first one is the difficulty and the cost linked to full scale experiments. The second one is the large range of information given by CFD codes. The last reason is the development of various CFD codes and the new performances of computers which allow large and complex calculations to be performed in a reasonable time.

The CFD users are generally aware that numerical simulations may lead to unrealistic results if no precaution is taken. There is a consensus on the need for a validation based on real experiments before using CFD codes for designing smoke control systems. Also the experience of users in the field of fire modelling cannot be neglected to ensure the quality of results.

Figure 4.5.3 presents some elements of a validation work carried out by CETU on the Ofeneegg tunnel fire experiments [79].

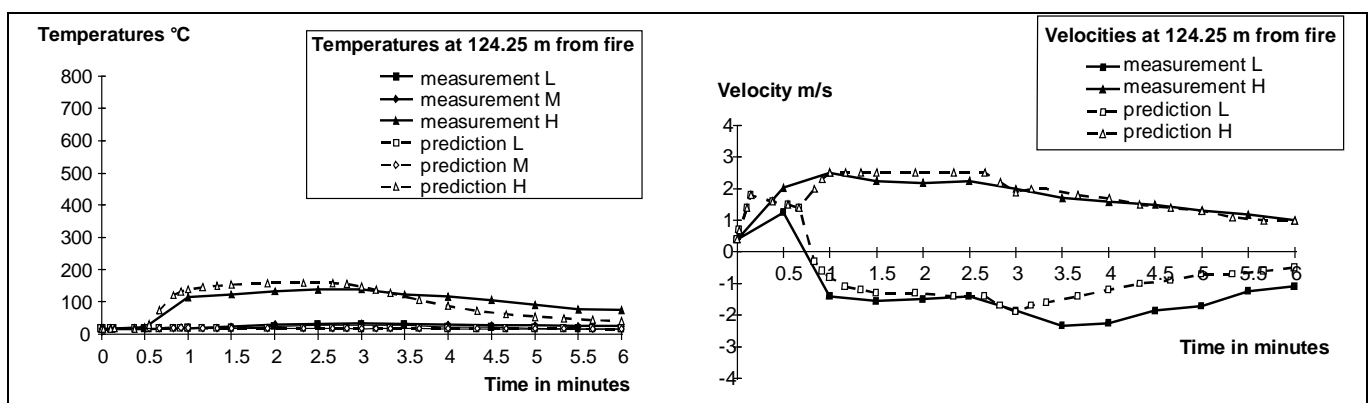


Figure 4.5.3 - Comparison between predicted and measured values at the free exit of the Ofeneegg tunnel

Unfortunately, few full scale fire experiments over the world provide measurements that can be used for CFD codes validation. On one hand, the tests are generally not performed to meet this objective. On the other hand, few experiments involve a wide range of ventilation conditions (the Memorial Tunnel fire tests may bring valuable answers as far as this question is concerned).

The calculation duration may appear as a limitation to the size of the models treated with CFD codes. Generally, tunnels longer than some hundred meters cannot be modelled in three dimensions on workstations. Therefore some assumptions must be done to set the boundary conditions if only a part of the tunnel is modelled.

IV.5.3 Background

In order to give an idea of the problem complexity, the fundamental equations are outlined. Then the computational methods are rapidly presented. In a first step, if the anisothermal and transient flow of a gas assumed to have a homogeneous composition is considered, the problem is to determine six unknown scalar functions: the three components u_x , u_y and u_z of the velocity, density ρ , pressure p and temperature T . They depend on four independent variables, the three space variables x , y and z and time t .

La mécanique des fluides et le premier principe de la thermodynamique fournissent l'équivalent de cinq équations scalaires différentielles, déduites de la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Elles sont généralement décrites sous la forme générale d'une équation de transport :

$$\frac{\partial(\rho \cdot \Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot \vec{u} \cdot \Phi + \vec{J}_\Phi) = S_\Phi \quad (\text{IV.6})$$

avec
$$\vec{J}_\Phi = -\Gamma_\Phi \cdot \vec{\text{grad}} \Phi \quad (\text{IV.7})$$

où Φ représente une propriété générale du fluide et ρ , \vec{u} , \vec{J}_Φ , S_Φ représentent respectivement la densité, le vecteur de vitesse, le vecteur flux de diffusion et le terme source par unité de volume. Γ_Φ représente le coefficient effectif d'échange par diffusion de Φ .

La thermodynamique fournit l'équation manquante pour résoudre le problème, généralement l'équation d'état des gaz parfaits :

$$\frac{\rho \cdot T}{P_0 + p} = \frac{\rho_0 \cdot T_0}{P_0} \quad (\text{IV.8})$$

où ρ_0 , P_0 et T_0 représentent respectivement les valeurs de référence de la densité de l'air, de la pression et de la température.

Le système des six équations différentielles non linéaires fortement couplées à six variables inconnues doit être complété par des équations supplémentaires décrivant la turbulence. Ces équations incluent les fluctuations de chaque scalaire transporté. Le modèle le plus fréquemment utilisé est le modèle k- ϵ (k : énergie cinétique de la turbulence ; ϵ : taux de dissipation de k).

Une simulation plus complète peut introduire une ou plusieurs équations de transport pour les gaz générés par la combustion (la fumée est la plupart du temps assimilée à un gaz, ce qui évite un calcul diphasique). Un modèle de rayonnement peut être utilisé pour compléter l'organisation des transferts thermiques. Enfin, un modèle de combustion peut être envisagé pour évaluer la dynamique des réactions chimiques dans la zone d'incendie.

Ce système très complexe nécessite manifestement l'utilisation de méthodes numériques. La méthode des éléments finis peut être appliquée. Cependant, celle des volumes finis, comparable aux différences finies, est plus souvent utilisée. Elle impose un maillage structuré, qui n'est pas trop gênant compte tenu de la géométrie très simple du tunnel, et conduit à des durées de calcul généralement plus courtes. De plus, elle est très "physique", dans la mesure où les différentes équations de conservation sont vérifiées dans chaque cellule.

La durée du calcul par ordinateur reste toujours longue avec les ordinateurs actuels. Une simulation 3D d'un incendie de quelques minutes sur plusieurs centaines de mètres demande plusieurs heures CPU sur un gros ordinateur et un jour ou plus sur une station de travail.

Fluid mechanics and the first principle of thermodynamics provide the equivalent of five scalar differential equations, deduced from the conservation of mass, momentum and energy. These have the general form of the following transport equation:

$$\frac{\partial(\rho \cdot \Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot \vec{u} \cdot \Phi + \vec{J}_\Phi) = S_\Phi \quad (\text{IV.6})$$

with

$$\vec{J}_\Phi = -\Gamma_\Phi \cdot \vec{\text{grad}} \Phi \quad (\text{IV.7})$$

where Φ stands for a general fluid property and ρ , \vec{u} , \vec{J}_Φ , S_Φ are density, velocity vector, diffusive flux vector and source rate per unit volume, respectively. Γ_Φ denotes the effective diffusive exchange coefficient of Φ .

Thermodynamics supply the missing equation to close the problem, this one being generally the state equation of ideal gas:

$$\frac{\rho \cdot T}{P_0 + p} = \frac{\rho_0 \cdot T_0}{P_0} \quad (\text{IV.8})$$

with ρ_0 , P_0 and T_0 the reference air density, pressure and temperature.

The system of six strongly coupled, non linear differential equations with six unknown variables obtained by this method have to be completed by additional equations describing turbulence. These equations involve the fluctuations of each transported scalar. The most commonly used model is the k- ϵ model (k: turbulence kinetic energy; ϵ : dissipation rate of k).

A more complete simulation may introduce one or several transport equations for the gases produced by combustion (smoke is usually assimilated to a gas to avoid diphasic calculation). A radiative model may be used to complete the organisation of the thermal transfers. Lastly, a combustion model may be considered to evaluate the dynamics of the chemical reactions in the fire zone.

This very complex system obviously requires to use computational methods. The finite element method can be applied. However, the finite volume method, similar to the finite differences, is more often used. It imposes a structured grid, which is not too annoying due to the rather simpler geometry of a tunnel, and leads to generally shorter computation times. In addition it is very "physical", for it ensures that the various conservation equations are observed in each cell.

The computation duration still remains lengthy with the current computers. A 3D simulation of a several minutes fire in a several hundreds meters long tunnel requires several CPU hours on a mainframe, and one day or more on a workstation.

IV.5.4 Recommandations

Comme indiqué précédemment, il existe différentes manières de modéliser les incendies avec les codes numériques. Le nombre de variables inconnues et la durée de calcul varient selon les hypothèses.

Il y a au moins 8 équations à résoudre pour des simulations 3D, les variables inconnues étant ρ , p , T , u_x , u_y , u_z , k et ε , et 7 équations à résoudre pour des simulations 2D. Des équations complémentaires peuvent être nécessaires afin de prendre en compte le transfert de chaleur par rayonnement, le processus de combustion ou le transfert de chaleur par conduction à l'intérieur des parois.

Puisqu'il existe différentes façons de modéliser un incendie, chacune sera commentée selon l'expérience des membres du groupe de travail. Ces commentaires ne doivent pas être considérés comme des recommandations, mais plutôt comme des conseils aux personnes qui débutent dans le domaine de la modélisation des incendies ou qui sous-traitent de tels calculs.

IV.5.4.1 Foyer de l'incendie

Il y a plusieurs possibilités pour modéliser le foyer.

- Modèle de combustion
Le modèle Eddy-Break-Up est le plus généralement utilisé. Cette méthode peut être intéressante si les informations que l'on veut obtenir à partir de la simulation portent sur la zone d'incendie. Les limites de cette méthode concernent la charge combustible de l'incendie. Il n'est en effet pas toujours possible de fournir une équivalence en termes de consommation de carburant.
- Puissance thermique fixée dans un volume
Dans ce modèle, le foyer est représenté par une puissance thermique fixée à l'intérieur d'un volume donné. Cette valeur n'est pas influencée par la ventilation. Cette méthode aboutit à une distribution d'énergie assez correcte à l'intérieur du tunnel. L'expérience montre que par cette méthode, on obtient des températures tout à fait réalistes, sauf à proximité immédiate de l'incendie.
- Flux de chaleur fixé à travers une surface horizontale
Cette technique impose un flux thermique ou un débit de masse à température fixée afin d'obtenir la puissance thermique de dimensionnement. La deuxième méthode conduit à créer un débit d'air qui n'est pas toujours compatible avec la production de gaz brûlés (il doit alors être combiné à un puits de masse). La distribution de l'énergie n'est pas aussi bonne que dans le cas précédent. Les résultats ne sont donc pas aussi fiables.
- Température fixée dans un volume
L'avantage de cette méthode est de pouvoir contrôler la température maximale atteinte à l'intérieur de l'incendie. L'inconvénient est que le flux de chaleur dépendra des conditions de ventilation.

IV.5.4 Recommendations

As explained previously, there are different ways to model fire with CFD codes. The number of unknown variables and the calculation duration vary according to the hypotheses.

There are at least 8 equations to solve in 3D simulations, the unknown variables being ρ , p , T , u_x , u_y , u_z , k and ε , and 7 equations to solve in 2D simulations. Additional equations may be required in order to take into account the radiative heat transfer, the combustion process or the heat transfer by conduction inside the walls.

Because there are different ways to model a fire, some comments will be given on each one, according to the experience of the members of the working group. They should not really be considered as recommendations, but more as an advice for people who would start in the tunnel fire modelling field or sub-contract such calculations.

IV.5.4.1 Fire source

There are several possibilities to model the fire source.

- Combustion process
The Eddy-Break-Up model is generally used. This method may be interesting if the information required from the simulation concerns the fire zone. The limitation concerns the fire load. It is not always possible to give an equivalence in terms of fuel consumption.
- Fixed heat release rate in a volume
In this model, the fire source is represented by a heat release rate fixed inside a given volume. This value is not influenced by the ventilation. This method leads to a rather correct energy distribution inside the tunnel volume. The experience shows that this method leads to quite realistic temperatures except very near the fire.
- Fixed heat flux through a horizontal surface
This technique imposes a heat flux or a mass flow rate at a fixed temperature in order to get the design heat release rate. The latter method leads to create a mass flow rate which is not always in agreement with the production of burned gases from the combustion (it must then be combined with a sink of mass). The volume energy distribution is not as good as in the previous case. The results are not as reliable.
- Fixed temperature in a volume
The advantage of this method is to control the maximum temperature reached inside the fire. A disadvantage is that the heat release rate will depend on the ventilation conditions.

La deuxième méthode (puissance thermique fixée dans un volume) devrait généralement avoir la préférence car elle est moins coûteuse (en temps CPU) que la modélisation du processus de combustion, et présente moins d'inconvénients que les autres méthodes.

Le chapitre II de ce rapport donne des informations sur les puissances thermiques de dimensionnement qui peuvent être utilisées directement avec cette méthode.

IV.5.4.2 Perte thermique par rayonnement

Les températures au cœur d'un incendie peuvent atteindre 1 300 °C. Le transfert thermique se produit plus par rayonnement que par convection. Des calculs réalisés avec des modèles de rayonnement ont conduit à surestimer les niveaux de température, même à des centaines de mètres du foyer d'un incendie. Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour la prise en compte du rayonnement.

- Modèle de rayonnement thermique couplé avec l'équation de conservation de l'énergie
Cette technique conduit à résoudre une équation supplémentaire. Deux sortes de modèles de rayonnement peuvent être utilisés. Le premier consiste en la résolution de l'équation de transfert thermique par rayonnement selon un maillage spécifique. Dans le second, on réduit la discrétisation de l'espace à six directions, ce qui permet de définir l'équation de transfert thermique par rayonnement sous une forme similaire à celle des autres équations de conservation. La plus grande difficulté provient de la faible connaissance des propriétés radiatives de la fumée, ce qui explique que des recherches soient encore menées à ce sujet.
- Contrôle des flux thermiques aux parois sans modélisation du transfert thermique par rayonnement
Cette solution consiste à regrouper les coefficients de flux thermique par rayonnement et par convection en un coefficient empirique de transfert local. Aucune autre équation n'est nécessaire. Cette méthode, utilisée par certains auteurs [77], a été appliquée au CETU pour simuler l'essai d'incendie à l'heptane H32 réalisé durant l'expérience EUREKA 499 [78]. Les résultats obtenus avec cette méthode sont convenables (figure 4.5.4).

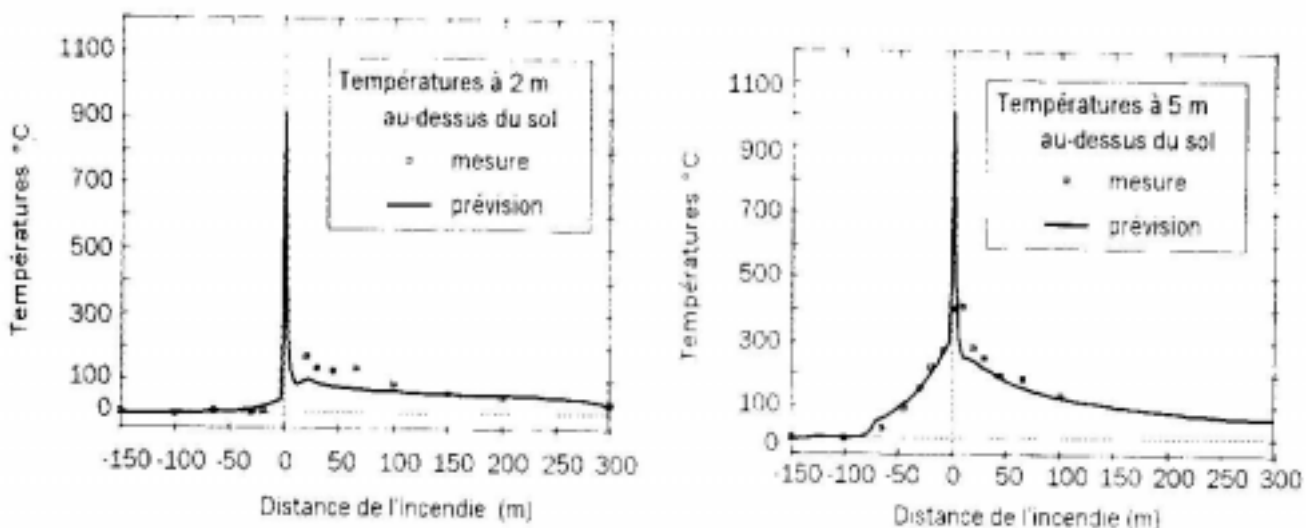


Figure 4.5.4 – Profils en long des températures prévues et mesurées à 2 et 5 m au-dessus de la chaussée (essai d'incendie H32, EUREKA 499 [78])

The second method (fixed heat release rate in a volume) should generally be preferred because it is cheaper (CPU time) than modelling the combustion process and presents less disadvantages than the other methods.

In addition, section II of this report gives information on design heat release rates, which can be directly used with this method.

IV.5.4.2 Radiative heat transfer

The temperatures inside the fire may reach 1300 °C. The heat transport is locally more radiative than convective. Calculations performed without radiative models have led to over-predict the thermal levels, even hundred meters away from the fire zone. Several techniques can be used to take radiation into account.

- Radiative heat transfer model coupled with the conservation equation of energy
This technique leads to solve an additional equation. Two kinds of radiative models may be used. The first one consists in solving the radiative heat transport equation according to a specific mesh. The second one consists in reducing the space discretisation to six directions, which allows to set the radiative heat transport equation in a similar form as the other conservation equations. The greatest difficulty comes from the poor knowledge of the radiative properties of the smoke which explains that some research works are currently carried out on this topic.
- Control of the heat fluxes at the walls without modelling the radiative heat transfer
This solution consists in lumping the radiative and convective heat transfer coefficient together in a local empirical transfer coefficient. No additional equation is required. This method, used by some authors [77], has been applied by CETU to simulate the heptane fire test H32 carried out during the EUREKA 499 experiments [78]. The results obtained with this method are reasonable (Figure 4.5.4).

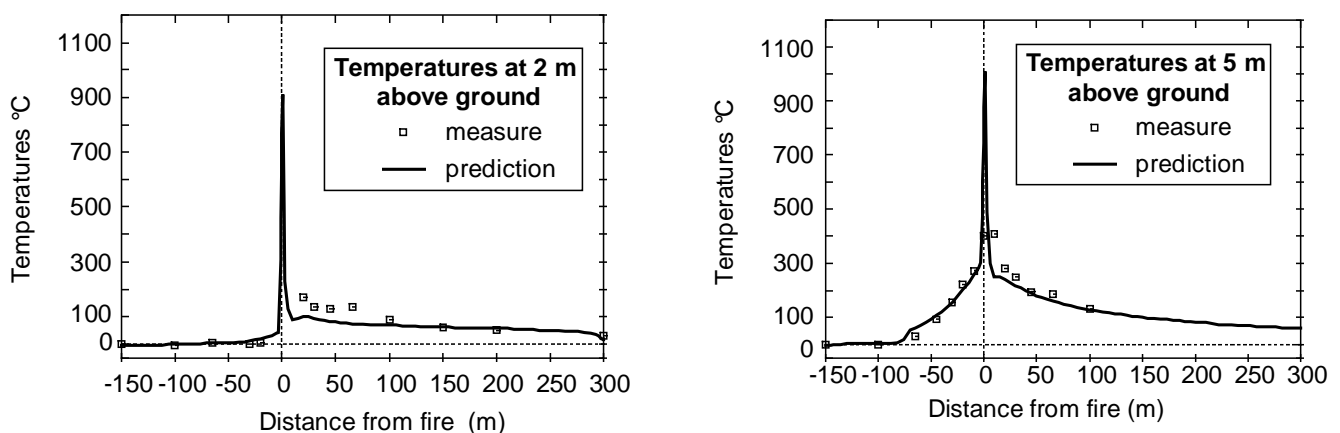


Figure 4.5.4 - Longitudinal profiles of predicted and measured temperatures at 2 m and 5 m above the floor (EUREKA 499 fire test H32 [78])

- Réduction à la source de la puissance thermique de l'incendie
La dernière solution consiste à réduire la puissance thermique du foyer réellement injectée dans le modèle en déduisant la portion rayonnée. Elle est mentionnée dans de nombreuses publications et le pourcentage d'énergie perdu par rayonnement au foyer de l'incendie est estimé entre 20 et 50 % de l'énergie thermique totale produite par la combustion. La principale difficulté de cette méthode réside dans le fait que la perte d'énergie par rayonnement vers les parois due aux gaz chauds à quelque distance de l'incendie n'est pas prise en compte.

La deuxième méthode (globalisation des coefficients de flux thermique par rayonnement et par convection) est recommandée lorsque les transferts thermiques par rayonnement ne sont pas modélisés. Elle peut être combinée avec la troisième méthode (réduction à la source de la puissance thermique de l'incendie pour prendre en compte les pertes par rayonnement à cet endroit).

IV.5.4.3 Conditions limites aux parois

- Conditions limites en quantité de mouvement
Une surface lisse est généralement la condition par défaut aux parois. Cependant, l'utilisateur peut définir des surfaces rugueuses en modifiant les paramètres de la loi logarithmique de couche utilisés par les codes pour représenter la zone tout contre les parois. L'utilisation de surfaces rugueuses dépend des objectifs de la simulation. Si l'on veut arriver à l'analyse de l'équilibre des forces ou la vitesse de propagation du front de fumée, les hypothèses faites sur les surfaces influenceront les résultats.
- Conditions limites du transfert thermique
 - *Température ou flux de chaleur fixés.* Dans ce cas, les températures aux parois ou les flux de chaleur à travers les parois sont fixés à une valeur constante. L'usage de températures fixes aux parois est préférable, spécialement en combinaison avec des coefficients de transfert thermique par rayonnement et par convection aux parois.
 - *Combinaison de températures et de flux de chaleur fixés.* Cette technique peut être utilisée afin de modéliser approximativement le processus de conduction de la chaleur à l'intérieur de la paroi. En fait, ce processus n'est pas ainsi directement pris en compte.
 - *Conduction de la chaleur à l'intérieur de la paroi.* Cette méthode se révèle être la meilleure interprétation physique du problème. Le transfert thermique aux parois peut avoir des effets appréciables, tout particulièrement dans le cas des incendies de longue durée. Cependant, il conduit à des maillages plus importants et à des calculs plus longs ; souvent, cela n'est pas nécessaire.

IV.5.4.4 Conditions limites aux têtes

Le choix des conditions limites aux têtes peut considérablement influencer sur les résultats.

- Pression fixe aux deux extrémités
Cette solution représente directement les effets atmosphériques. L'influence de l'emplacement des conditions limites a été étudiée [80]. Il apparaît que la taille critique de la zone externe à modéliser doit être comprise entre 3 et 5 diamètres hydrauliques [80]. Cependant, des résultats convenables peuvent être obtenus sans domaine extérieur, si certaines précautions sont prises, ou même des corrections apportées.

- Reduction of the heat release rate at the fire source

The last solution consists in reducing the actual heat release source injected in the model by deducing the radiative part. It has been used in several publications and the percentage of energy lost by radiation at the fire source is estimated to be in the range of 20% to 50% of the total heat energy released by combustion. The major problem of this method is due to the fact that the radiative energy lost by the hot gases to the walls farther from the fire is not taken into account.

The second method (lump radiative and convective heat transfer coefficient at the walls) is recommended in the case where the radiative heat transfers are not modelled. It can be combined with the third method (lump reduction of the heat release source to take into account radiative losses at the fire site).

IV.5.4.3 Boundary condition at the walls

- Momentum boundary conditions

Smooth surfaces are generally the default condition at the wall. However, the user may generally define rough surfaces by modifying the parameters of the logarithmic layer law used by the codes to represent the zone very near the walls. The use of rough surfaces depends on the objectives of the simulations. If they concern the analysis of the forces balance or the propagation speed of the smoke front, the assumption made on surfaces will influence the results.

- Heat transfer boundary conditions

- *Fixed temperature or heat fluxes.* In this case, the temperature at the walls or the heat fluxes through walls are fixed to constant values. The use of fixed temperatures at the walls is nevertheless preferable, especially in combination with a lump radiative and convective heat transfer coefficient at the walls.
- *Combination of fixed temperature with heat fluxes.* This technique may be used in order to roughly model the heat conduction process in the rock. Actually, it does not directly take it into account.
- *Heat conduction inside the rock.* This method appears as the best physical interpretation of the problem. The heat transfer to the walls may have noticeable effects especially in the case of long fires. However, it leads to larger meshes and longer calculation and is often not necessary.

IV.5.4.4 Boundary condition at the portals

The choice of the boundary conditions at the portals may seriously influence the final results.

- Fixed pressures at both ends

This solution directly represents the atmospheric effects. The influence of the boundaries location has been studied [80]. It appears that the critical size of the outside zone to be modelled should be comprised between 3 and 5 hydraulic diameters [80]. However, acceptable results can be obtained with no outside domain provided that some precautions or even corrections are used.

- Propriétés des fluides fixées à une extrémité et pression fixée à l'autre extrémité
Cette solution peut se justifier par l'analyse des conditions régnant dans le tunnel sous des effets connus de ventilation. La condition en amont semble être quelque peu limitative car elle force l'écoulement à aller dans un sens, spécialement si les composantes de la vitesse sont imposées.
- Utilisation de modèles simplifiés
Cette technique peut être appliquée dans le cas de tunnels longs, qui ne peuvent être entièrement modélisés et pour lesquels les conditions limites sont difficiles à fixer. Il est recommandé d'utiliser un modèle simplifié (à une dimension par exemple) afin d'estimer globalement l'écoulement dans tout le tunnel et d'en déduire les conditions limites à imposer aux deux extrémités du maillage.

IV.5.4.5 Choix entre simulation 2D et simulation 3D

Les simulations 3D nécessitant de longs temps de calcul, les simulations 2D peuvent apparaître comme des variantes attractives. La simplification du problème sous la forme d'un écoulement entre deux plans requiert tout de même quelques précautions :

- pour prendre en compte la réduction des forces de frottement, certains auteurs introduisent une force volumique supplémentaire [81] ;
- une autre solution fondée sur les similitudes peut aussi être utilisée ; elle est basée sur les nombres de Reynolds (équation IV.2) et de Froude (équation IV.3), et sur les paramètres d'énergie non dimensionnels.

Les paramètres d'énergie non dimensionnels représentent l'énergie produite par l'incendie ou par la quantité de carburant injecté par mètre carré de section transversale du tunnel de façon à respecter l'analogie avec le tunnel réel, c'est-à-dire que

$$\frac{\dot{Q}_{\text{incendie}}}{S_{\text{tunnel}}} \text{ est identique en 2D et en 3D}$$

où Q_{incendie} est la puissance thermique et S_{tunnel} la section transversale du tunnel.

Ces contraintes agissent sur la géométrie et la gravité. Des validations ont été entreprises à partir des expériences du tunnel de l'Ofenegg [79] (figure 4.5.5).

Certaines limites importantes doivent être mentionnées. Par exemple, cette technique ne décrit pas correctement la stratification lorsque la vitesse longitudinale est plus basse que la valeur critique [80]. De fait, les simulations en 2D nécessitent des précautions spécifiques et ne peuvent être utilisées que dans certains cas.

- Given fluid properties fixed at one end and fixed pressure at the other end
This solution may be justified for the analysis of the conditions inside the tunnel with known ventilation effects. The upstream condition appears to be quite limitative because it forces the flow to one direction, especially if the velocities components are imposed.
- Use of simplified models
This technique may be applied in the case of long tunnels, which are not entirely modelled and for which the boundary conditions are difficult to describe. It is recommended to use a simplified model (1D model for instance) in order to estimate globally the flow in the complete tunnel and derive the boundary conditions to impose at both ends of the mesh.

IV.5.4.5 Choice between 2D and 3D simulations

As 3D simulations require long calculation times, 2D simulations may appear as attractive alternatives. This simplification of the problem by a flow between two planes requires some precautions:

- to take into account the reduction of the friction forces, some authors introduce additional volume forces [81];
- another solution based on similarities may also be used and is based on the Reynolds (equation IV.2), Froude (equation IV.3), and energy non-dimensional parameters.

The energy non-dimensional parameters represent the energy released by the fire or the quantity of fuel injected per square meter of tunnel cross-sectional area to respect the analogy with the actual tunnel, that is

$$\frac{\dot{Q}_{\text{fire}}}{S_{\text{tunnel}}}$$

should be the same in 2D and 3D ,

where \dot{Q}_{fire} is the heat release rate and S_{tunnel} the tunnel cross-sectional area.

These constraints influence the geometry and the gravity terms. A validation work has been performed on the basis of Ofenegg tunnel experiments [79] (Figure 4.5.5).

Some important limitations must be mentioned. For example, this technique does not describe correctly the stratification in the case when the longitudinal velocity is lower than the critical value [80]. Consequently 2D simulations require specific precautions and can be used in specific situations only.

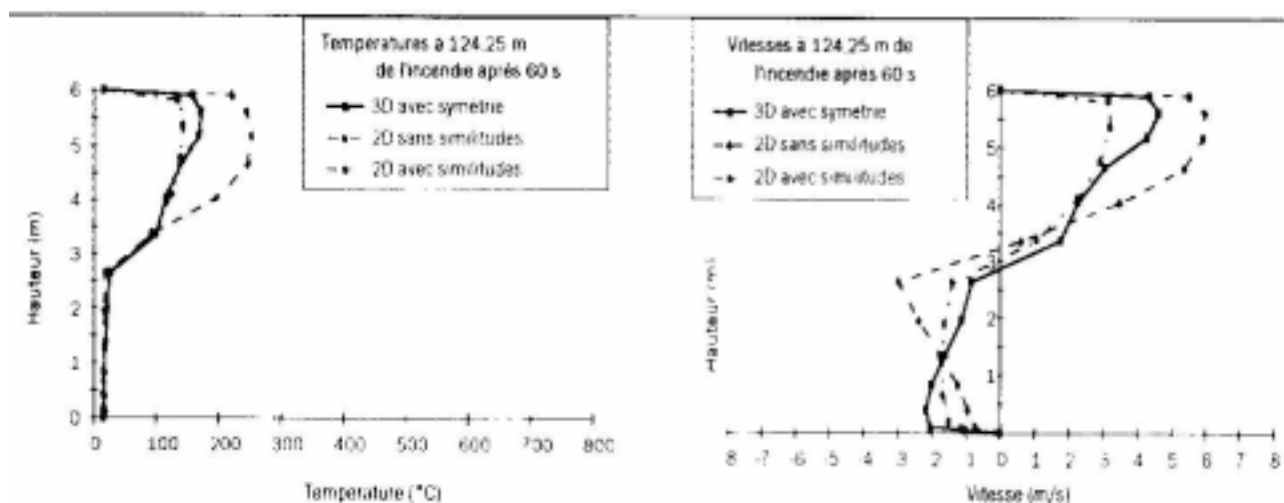


Figure 4.5.5 - Comparaison entre simulations 2D et 3D (essai d'incendie n° 1 [79])

IV.5.6 Conclusions

Le principal avantage des simulations numériques par modèle de champ est de permettre d'étudier des cas pour lesquels aucune donnée expérimentale n'est disponible. Si une validation préliminaire a été réalisée à partir d'essais en vraie grandeur, ils peuvent servir à simuler de nombreux autres cas. Cette technique fournit une description générale des divers phénomènes et est la seule capable d'offrir de telles possibilités, même si les résultats doivent plutôt être considérés comme des ordres de grandeur.

Les principales limites de cette technique sont le temps nécessaire au calcul et la complexité de son usage : de ce point de vue, la méthode n'a pas encore atteint le degré de maturité des calculs de structure par éléments finis par exemple. Des validations préliminaires plutôt longues et des utilisateurs expérimentés sont nécessaires ; sinon les résultats risquent d'être tout à fait trompeurs.

Les modèles de champ sont donc principalement adaptés à certains usages spécifiques :

- établir des règles générales de dimensionnement en simulant des cas types,
- explorer des situations nouvelles ou spécialement complexes,
- approfondir la compréhension des incendies réels et les analyser (comme cela a été fait, par exemple, pour la catastrophe de la station londonienne de métro King's Cross [82]).

De plus, un certain nombre d'avantages peuvent être tirés de l'utilisation de ces modèles en les associant à d'autres méthodes d'étude. Par exemple, quelques simulations numériques préliminaires –et, si besoin est, très imprécises – seront profitables aux essais en vraie grandeur afin d'évaluer les phénomènes prévus et leur ordre de grandeur. De plus, un programme d'essais sur des maquettes à échelle réduite pourrait gagner à être préparé par calcul d'évaluation de la qualité des similitudes et des ordres de grandeur. Les maquettes à échelle réduite permettraient alors d'étudier le phénomène en faisant varier les paramètres intéressants. Enfin, de nouveaux calculs pourraient être réalisés pour, dans un premier temps, caler le code numérique et, dans un deuxième temps, comprendre, voire extrapoler, les mesures.

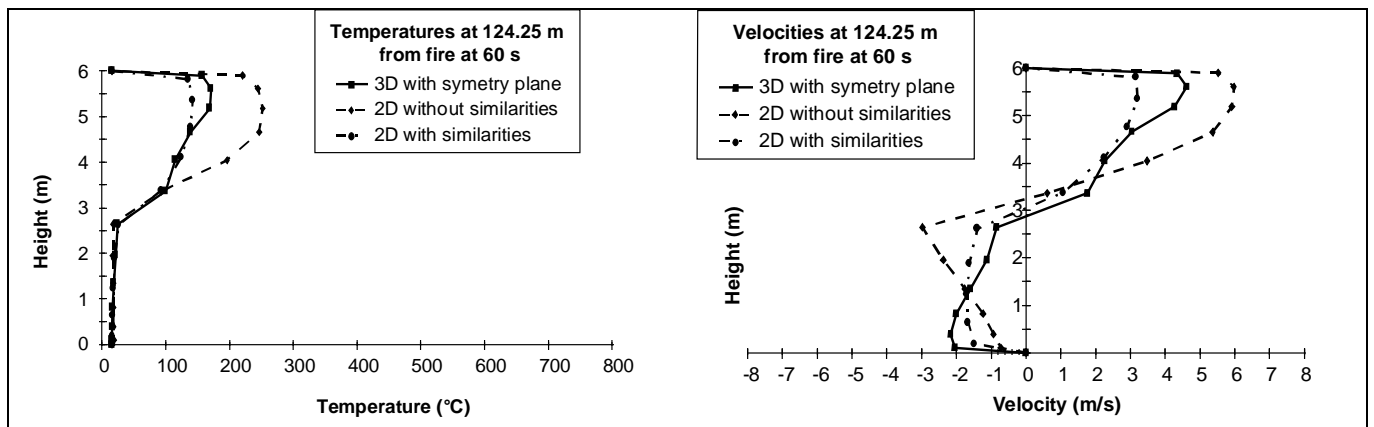


Figure 4.5.5 - Comparison between 2D and 3D simulations (fire test No.1 [79])

IV.5.6 Conclusions

The main advantage of the CFD models is to allow the study of cases for which no experimental data are available. If a preliminary validation has been made from full scale tests, they should be able to simulate many other situations. This technique provides a general description of the various phenomena. This is the only method that offers such possibilities, even if the results must rather be considered as orders of magnitude.

The major restriction is the time needed for the calculation and the complex utilisation: from this point of view the method has not yet come to the same maturity as for instance the structure calculation by finite elements. Rather lengthy preliminary validations and skilful users are necessary; otherwise the obtained results may be quite misleading.

The CFD models are therefore adapted principally to certain specific uses:

- to set up general design rules by simulating typical cases;
- to investigate new or specially complex situations;
- to get a thorough understanding of actual fires and to analyse them (as it has been done for instance for the disaster at the King's Cross underground station in London [82]).

Moreover there are a lot of advantages that can be drawn from their use in conjunction with other study methods. For instance, full size testing will profit from some preliminary computational simulations - if necessary very approximate - in order to assess the expected phenomena and their orders of magnitude. Also, a test programme on scale models would advantageously be prepared by calculations aimed at evaluating the quality of similarities and orders of magnitude. The reduced scale model will then allow to make the study by varying the useful parameters. Lastly, new calculations can be made in order to calibrate the computational code in a first step, and in a second step to understand - even extrapolate - the model measurements.

Afin de simuler les incendies dans de grands tunnels ou dans des réseaux souterrains complexes, il pourrait être utile de combiner une simulation 3D avec d'autres simulations plus simples, comme la 2D ou la 1D, pour déterminer les conditions limites. Cette technique apparaît potentiellement intéressante pour le développement des simulations numériques [80].

Les modèles de champ comprennent de nombreux modèles physiques qui ont été validés sur quelques expériences fondamentales, mais peu de validations globales ont été réalisées sur des essais d'incendie en vraie grandeur. Ainsi, les bases de données tirées des essais EUREKA 499 et du Memorial tunnel devraient-elles être très utiles pour la validation des modèles numériques. Ces travaux ont déjà commencé dans divers pays, mais ils nécessitent beaucoup de temps.

L'espoir de mettre au point un modèle numérique, pouvant facilement être utilisé par des personnes non averties qui auraient juste à appuyer sur un bouton (car ce modèle aurait été calé et les nombreux paramètres auraient tous été ajustés) est probablement utopique. Des travaux préliminaires de validation doivent comparer, à la fois qualitativement et quantitativement, les résultats et mesures afin de définir des règles de conduite des simulations d'incendie ; mais cela ne doit pas amener à ajuster tous les paramètres sans raisons physiques, car de tels calages de modèles ne pourraient pas être transposés à d'autres configurations.

IV.6 Besoins en futurs travaux de recherche

La communauté internationale a fourni de grands efforts et investissements dans les programmes de recherche en matière de sécurité incendie dans les tunnels durant les dix dernières années. Le nombre de congrès internationaux consacrés à ce sujet, l'expansion de la modélisation des incendies et les deux grands programmes d'essais réalisés ces dernières années en Europe (EUREKA 499) et aux États-Unis (Memorial Tunnel) confirment cette tendance.

Les modèles numériques sont déjà largement utilisés pour étudier les situations d'incendie en tunnel et devraient se développer à l'avenir, mais des recherches et des travaux de validation sont nécessaires pour assurer la validité des résultats.

Certaines recherches doivent être faites pour améliorer les modèles existants, comme ceux sur la turbulence et la combustion, mais ils ne sont pas spécifiques aux tunnels et concernent la modélisation de la dynamique des fluides. Ces recherches sont traditionnellement conduites par des universités et des laboratoires, dont les activités sont axées sur les phénomènes fondamentaux de dynamique des fluides et le développement des codes de champ.

D'autres travaux de recherche sont spécifiques aux tunnels ; ils consistent en l'adaptation ou le calage de modèles physiques pour la modélisation des incendies. De telles recherches ont été menées par exemple pour améliorer le modèle standard $k-\varepsilon$ qui pourrait ne pas estimer correctement la longueur du retour de fumée [83].

In order to simulate fires in long tunnels or complex underground networks, it may be useful to couple a 3D simulation with simplified ones such as 2D or 1D models in order to determine boundary conditions. This technique appears as a potential development of the numerical simulation [80].

The CFD models include several physical models which have been validated against fundamental experiences, but few global validations have been made on full scale fire tests. In this way, the data bases drawn from the EUREKA 499 and the Memorial Tunnel experiments should be very useful for validating CFD models. This work has already started in different countries but requires much time.

The hope to set up a CFD model which could be easily used by unskilled users who would have to only press a button, because the model would have been calibrated and all the numerous parameters would have been fitted, is probably unrealistic. A preliminary validation work must compare qualitatively and quantitatively calculated results and measurements in order to define rules for running fire simulations, but it must not lead to fit all the parameters without physical reasons because such calibration could not be transposed to other configurations.

IV.6 Needs for further research work

The international community has made large efforts and investments in research programmes on fire safety in tunnels during the last decade. The number of international congresses on this subject, the development of fire modelling and the two large fire tests carried out these last years in Europe (EUREKA 499) and in the USA (Memorial Tunnel) confirm this tendency.

The CFD codes are already largely used to study fire situations in tunnels and should go on developing in the future, but research and validation works are required to ensure the validity of their results.

Some research works are required to improve existing models, such as turbulence or combustion models, but they are not specific to tunnels and concern fluid dynamics modelling. These research works are generally done by universities and laboratories, the activity of which deals with fundamental fluid dynamics phenomena and development of CFD codes.

Some other research works are more specific to tunnels and consist in adapting or calibrating physical models for fire modelling. Such research work has been done for example to improve the standard k- ϵ model which might not correctly estimate the length of backlayering [83].

Des données expérimentales sont nécessaires à la validation des codes numériques ; ces données ne sont pas toujours disponibles car beaucoup de grands essais d'incendie menés dans le passé étaient réalisés pour d'autres objectifs. Les programmes d'essais incendie EUREKA 499 et du Memorial Tunnel ont été réalisés en prenant cet objectif en compte ; ils ont ainsi pu permettre de créer des bases de données très intéressantes pour la communauté internationale et ce, afin de valider les codes numériques.

De nouvelles expérimentations, que ce soit à échelle réduite ou en vraie grandeur, doivent être entreprises à l'avenir, en ayant pour objectif principal de valider et caler les modèles physiques. Cela peut porter sur la compréhension des écoulements générés par l'incendie, tout comme sur les mesures de certaines propriétés physiques de la fumée, qui font défaut aux modèles (par exemple, propriétés de rayonnement de la fumée, génération de suie).

Manifestement, les différentes approches présentées dans ce chapitre sont complémentaires. Le choix d'une approche pour étudier la situation des incendies dans les tunnels, aussi bien pour la recherche que pour la conception d'un tunnel, dépend des objectifs poursuivis dans chaque situation.

IV.7 Conclusion

Étudier le problème d'un incendie dans un tunnel requiert des moyens spécifiques. Ces derniers doivent être adaptés aux objectifs et aux ressources financières qui peuvent raisonnablement être dépensées compte tenu des enjeux de l'étude.

Le tableau 4.7.1 présente une synthèse du point de vue de la conjugaison des moyens et des objectifs de recherche pour la sécurité incendie dans les tunnels.

The validation of CFD codes requires experimental data which are not always available because many large fire experiments carried out in the past had other objectives. The EUREKA 499 and Memorial Tunnel fire tests programmes have been performed taking into account this objective, so that they provide very interesting databases for the international community to validate CFD codes.

New small or large scale experiments should be undertaken in the future with the priority objective of validating and calibrating physical models. It may concern the understanding of flow generated by fire as well as measurements of some physical smoke properties which are missing for models (i.e. radiative smoke properties, generation of soot).

Obviously the different approaches which have been presented in this section are complementary. The choice of one approach for studying fire situation in tunnels, as well as for research or tunnel design, depends on the objectives which are sought in each case.

IV.7 Conclusion

Studying the problem of a fire in a tunnel requires specific means. They have to be adapted to the aims and the amount of money which can reasonably be spent in the study with respect to its stakes.

Table 4.7.1 gives a synthetic point of view about the combination of the means and the objectives of investigation in fire safety in tunnels.