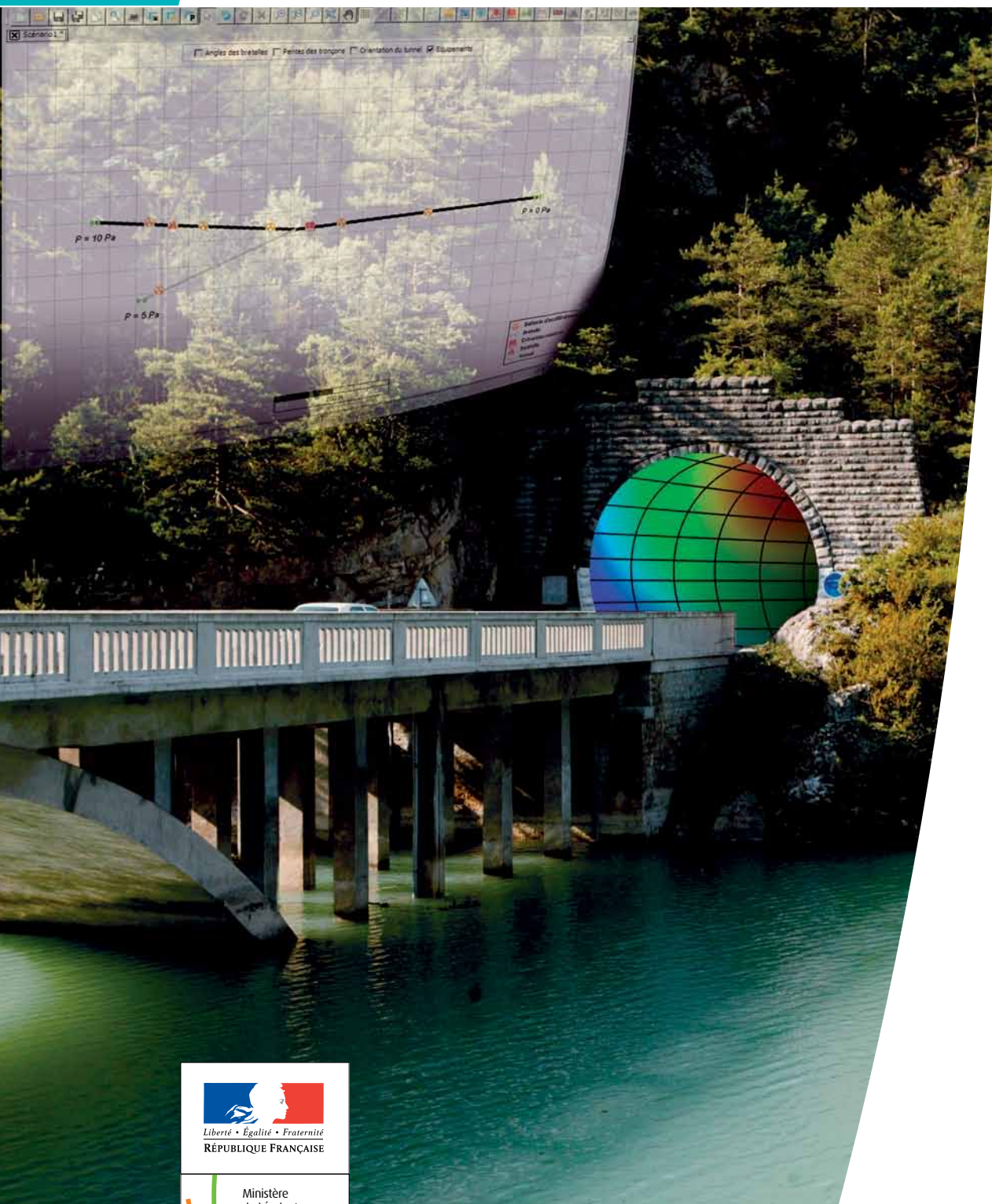


LA MODÉLISATION AÉRAULIQUE POUR LES TUNNELS FASCICULE 1 : OUTILS ET CRITÈRES DE CHOIX



Ressources, territoires, habitats et logement
Énergies et climat
Prévention des risques

Développement durable
Infrastructures, transports et mer

Présent
pour
l'avenir

AVERTISSEMENT

Les guides sont l'aboutissement de travaux de synthèse, de réflexion méthodologique, de recherche, de retour d'expérience, menés ou commandités par le CETU. Ils ont vocation à servir de référence pour la conception, la réalisation ou l'exploitation des ouvrages souterrains. Comme tout état de l'art à un moment donné, un guide peut toutefois devenir un jour obsolète, soit du fait de l'évolution des techniques ou des réglementations, soit par la mise au point de méthodes plus performantes.

*LA MODÉLISATION AÉRAULIQUE
POUR LES TUNNELS
FASCICULE 1 : OUTILS ET CRITÈRES DE CHOIX*

décembre 2011

Centre d'Études des Tunnels

25, avenue François Mitterrand

Case n°1

69674 BRON - FRANCE

Tél. 33 (0)4 72 14 34 00

Fax. 33 (0)4 72 14 34 30

cetu@developpement-durable.gouv.fr

www.cetu.developpement-durable.gouv.fr

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	5
1. Les modèles aérauliques et leurs applications	6
2. Les modèles monodimensionnels	7
3. Les modèles tridimensionnels	8
3.1. Généralités	8
3.2. Principaux choix en modélisation 3D	8
3.2.1. L'outil de calcul	8
3.2.2. La délimitation du domaine modélisé	8
3.2.3. Le maillage et les sous-modèles	9
3.2.4. Les conditions aux limites	9
3.2.5. Les termes sources et la représentation des foyers d'incendie	9
3.2.6. Régime permanent ou régime transitoire	10
3.2.7. Applications spécifiques	10
4. Interactions et complémentarités entre les modèles	11
4.1. Critères de choix entre les modélisations 1D et 3D	11
4.2. Utilisation complémentaire des deux types de modèles	11
5. Dispositions contractuelles à envisager	13
5.1. Rédaction du cahier des charges de l'étude	13
5.2. Contrôle qualité	13
6. Conclusions	14
Annexes	15
Annexe A – Le logiciel <i>CAMATT</i>	15
Annexe B – Le logiciel <i>FDS</i>	15
Glossaire	16

INTRODUCTION

Les études de ventilation et de sécurité des tunnels nécessitent des simulations numériques permettant d'estimer les mouvements d'air et éventuellement de fumées dans diverses circonstances. Ces simulations font appel à des logiciels ici désignés comme « outils de modélisation aérodynamique ».

En matière de sécurité incendie, les résultats fournis par ces outils constituent un élément déterminant d'appréciation du niveau de sécurité d'un tunnel et peuvent parfois conduire à modifier profondément un projet. Dans d'autres aspects de l'exploitation, les résultats de calcul aérodynamique peuvent aussi conditionner des investissements importants, par exemple en ce qui concerne la limitation des impacts des tunnels routiers sur leur environnement immédiat.

Cela impose un haut niveau d'exigence dans la fiabilité des outils utilisés et dans l'interprétation qui est faite des résultats. Ces outils ne sont normalement utilisés que par des spécialistes, et le maître d'ouvrage est souvent très démuni pour apprécier la pertinence des choix réalisés par ses prestataires. Cette situation peut être préjudiciable à un projet compte tenu des enjeux liés aux conclusions tirées de l'utilisation de ces outils.

Face à ce constat, le présent fascicule est destiné aux maîtres d'ouvrage et à ceux qui les assistent. Sans prétendre faire du lecteur un spécialiste de la modélisation, il a pour objectifs d'expliquer les principaux choix à réaliser dans les études, de donner aux responsables de projet les notions essentielles relatives aux possibilités et aux limites de la modélisation, et de permettre l'utilisation optimale des ressources financières et humaines et des délais disponibles. Comme les enjeux sont généralement importants, il est judicieux que le maître d'ouvrage fasse appel à un assistant compétent dans ce domaine de modélisation.

Deux autres fascicules complètent le présent guide. À l'usage cette fois des spécialistes, ils s'adressent aux maîtres d'œuvre, aux bureaux d'études chargés des simulations numériques et de leur interprétation, et à ceux qui les contrôlent. Ils traitent respectivement des modélisations monodimensionnelles (fascicule 2) et tridimensionnelles (fascicule 3, à paraître).

LES MODÈLES AÉRAULIQUES ET LEURS APPLICATIONS

Les écoulements d'air dans et autour des tunnels doivent souvent faire l'objet d'études assez détaillées car leur comportement est essentiel pour la sécurité de l'ouvrage, ainsi que pour la qualité de l'air dans le tunnel et dans son environnement immédiat.

En matière de sécurité incendie, la réglementation impose dans de nombreux cas aux tunnels d'être équipés d'un système de ventilation. Son dimensionnement nécessite des calculs qui peuvent être simples ou plus compliqués selon les situations. En outre, la vérification des performances du désenfumage, mécanique ou naturel, dans la configuration exacte de l'ouvrage est primordiale, à la fois pour valider sa conception et pour évaluer le niveau général de sécurité du tunnel. Ceci implique l'étude de scénarios d'incendie et constitue, pour les tunnels routiers, le cœur de l'étude spécifique des dangers (ESD) et la base des consignes d'utilisation de la ventilation. La modélisation est aujourd'hui devenue un outil incontournable dans le domaine de la sécurité incendie.

En matière d'environnement, les rejets d'air pollué par les tunnels routiers peuvent poser problème en milieu urbain dense. Des études sont alors menées pour évaluer plus précisément leur impact. Différentes méthodes d'étude existent. Parmi celles-ci, la modélisation numérique est de plus en plus fréquemment envisagée pour des raisons de coût et de délai inférieurs à ceux qu'implique la solution classique consistant à réaliser une maquette.

La forme la plus simple de modélisation aéraulique consiste à utiliser des équations décrivant le comportement de l'ensemble du système étudié (dites « intégrales »), qu'on peut résoudre « à la main ». Malheureusement, il est rare que les phénomènes physiques considérés puissent être décrits par de telles équations avec une précision suffisante. Les simplifications nécessaires, souvent assez grossières, induisent soit un risque de surdimensionnement excessif, soit une incertitude inacceptable quant au niveau de sécurité réel. On a donc maintenant recours, de manière quasi-systématique, à des outils numériques plus ou moins complexes, qui sont principalement de deux types :

- les modèles monodimensionnels, 1D en abrégé;
- les modèles tridimensionnels ou 3D. On utilise souvent pour ceux-ci la dénomination anglaise CFD pour *Computational Fluid Dynamics* (mécanique des fluides numérique).

LES MODÈLES MONODIMENSIONNELS

Ces modèles sont utilisables uniquement pour décrire l'écoulement **à l'intérieur d'un tunnel**. Ceci représente toutefois la très grande majorité des calculs réalisés. L'hypothèse de base de ces modèles est que toutes les variables de l'écoulement (pression, vitesse, température, concentrations en gaz toxiques, etc.) sont **uniformes** sur toute section droite (c'est-à-dire profil en travers) du tunnel. Cette hypothèse est généralement raisonnable en l'absence d'incendie (pour les calculs de pollution par exemple). Elle n'est cependant jamais strictement vérifiée en présence d'un incendie, même dans des situations où on parle de fumées déstratifiées (situations qui correspondent généralement à une visibilité très dégradée en partie basse). *A fortiori*, la présence de fumées stratifiées en plafond ne peut pas être prise en compte. D'autres phénomènes, comme la variation de l'efficacité de l'extraction en ventilation transversale, sont également ignorés du fait de cette hypothèse.

Malgré ces limitations théoriques, les modèles 1D peuvent rendre de grands services. Leur principale utilité est de calculer la vitesse moyenne de l'air en tout point d'un tunnel dans des configurations assez complexes : présence d'équipements de ventilation, de trafic, tunnels avec bretelles, etc. **Cela est suffisant pour la majorité des études de dimensionnement** de la ventilation, qu'elle soit longitudinale ou transversale. Dans ce dernier cas, le débit d'extraction est en effet souvent tiré de la réglementation et les ajustements portent surtout sur le contrôle du courant d'air.

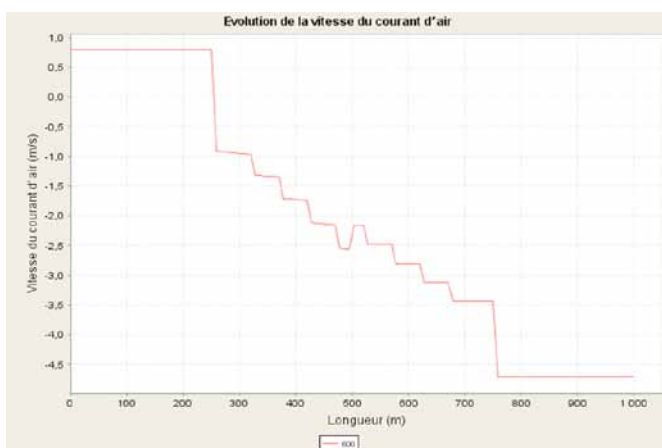


Figure 1 : Le profil de vitesse en fonction de l'abscisse est un résultat de calcul 1D permettant d'apprécier le comportement d'un tunnel ventilé transversalement.

Les modèles 1D utilisent des formulations simples pour décrire certains phénomènes comme les pertes de charge ou l'influence du trafic. Ces formulations semi-empiriques s'avèrent souvent plus précises que des simulations 3D des mêmes phénomènes, sauf à utiliser des ressources considérables pour ces dernières. La prise en compte de ces formulations dans le modèle aérodynamique en 1D est facile et n'alourdit pas significativement le calcul.

Les modèles 1D présentent également l'avantage de ne nécessiter que des temps de préparation et de calcul très courts, même pour des tunnels longs comportant de nombreux équipements. Pour simuler un incendie dans un ouvrage de complexité moyenne, il faut quelques dizaines de minutes à un utilisateur régulier pour définir le problème, et quelques secondes de calcul par scénario d'incendie. L'interprétation et la mise en forme des résultats sont souvent plus longues que les calculs eux-mêmes. À partir des résultats, une personne possédant une bonne connaissance de la physique des incendies en tunnel sera généralement capable d'évaluer qualitativement le niveau de danger dans les différents scénarios testés.

Toutes ces caractéristiques font des modèles 1D l'outil le mieux adapté pour dimensionner et étudier le fonctionnement général de la ventilation d'un ouvrage, ainsi que pour apprécier qualitativement les effets d'un incendie dans la majorité des cas. L'évaluation des risques peut même être quantitative dans des situations simples. Certains résultats sont bien sûr à prendre avec précaution du fait des simplifications employées ; une certaine expertise de l'utilisateur dans les domaines de la mécanique des fluides et des incendies en tunnel est donc toujours nécessaire.

Le temps consacré à chaque calcul étant très réduit, il est peu onéreux d'effectuer des investigations complémentaires intéressantes telles que des études de sensibilité à des paramètres potentiellement incertains, par exemple :

- la différence de pression entre les têtes,
- la puissance de l'incendie,
- les délais de réaction,
- les fuites dans le réseau de ventilation,
- l'efficacité d'installation des accélérateurs, etc.

On trouvera en annexe A une brève description d'un modèle 1D développé par le CETU et appelé CAMATT.

LES MODÈLES TRIDIMENSIONNELS

3.1 GÉNÉRALITÉS

Dans ce type de modèle, l'espace est « discrétisé », c'est-à-dire découpé en volumes élémentaires ou *cellules*, selon un maillage tridimensionnel. Les grandeurs physiques sont calculées dans chacune de ces cellules. On s'affranchit donc de l'hypothèse la plus forte des modèles 1D. **Il serait cependant illusoire de penser que les modèles 3D représentent la réalité avec une fidélité parfaite.** En effet, en mécanique des fluides, des phénomènes physiques ou chimiques influençant très fortement l'écoulement se produisent à une échelle spatiale et/ou temporelle très petite. Une description idéale de ces phénomènes nécessiterait un maillage si fin qu'aucun ordinateur ne pourrait effectuer les calculs en un temps raisonnable. Cette contrainte oblige à formuler des hypothèses dont le sens physique et l'influence sur le résultat sont beaucoup plus difficiles à percevoir que pour l'hypothèse d'écoulement monodimensionnel. Par ailleurs, ces hypothèses peuvent concerner un grand nombre de paramètres ou de phénomènes. De ce fait, les modèles 3D ont des limitations, tout comme les modèles 1D, mais la compréhension de ces limitations nécessite des compétences particulières dans ce domaine de modélisation. De plus, les possibilités de modélisation d'un ouvrage donné sont variées et **le choix de la modélisation dépendra beaucoup de l'objectif exact de l'étude.**

Les incertitudes liées à une modélisation 3D sont généralement impossibles à quantifier. **Il est donc souvent judicieux d'adopter une méthodologie comparative** (de scénarios, de solutions techniques) plutôt que de chercher à évaluer des performances absolues. Si la modélisation est réalisée correctement, elle peut alors constituer un excellent outil d'aide à la décision.

Les principaux choix à effectuer pour réaliser une modélisation 3D fiable, ainsi que leurs enjeux, sont détaillés ci-après.

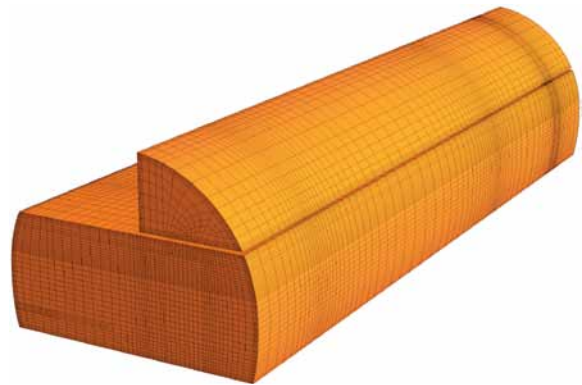


Figure 2 : Exemple de maillage d'une portion de tunnel et de gaine de désenfumage

3.2 PRINCIPAUX CHOIX EN MODÉLISATION 3D

Les termes soulignés et suivis de ⁶ sont définis dans le glossaire page 16.

3.2.1 L'outil de calcul

L'outil de calcul employé dépend du type de problème traité et des besoins associés : géométrie, variables de sortie les plus pertinentes, calcul en régime permanent ou transitoire, modélisation optimale de tel ou tel phénomène, etc. Pour les incendies en tunnel, le logiciel *FDS* est de plus en plus utilisé (voir annexe B) mais d'autres outils plus généralistes existent et peuvent se révéler mieux adaptés dans certains cas. Il serait impossible de lister tous les cas d'emploi des différents logiciels du marché, tant le choix peut être influencé par des consi-

dérations très spécifiques à une étude donnée. Bien souvent, les outils ayant le champ d'application le plus étendu sont aussi les plus coûteux en temps de préparation et de calcul.

3.2.5 La délimitation du domaine modélisé

Ce choix semble le plus simple, mais il est essentiel car il conditionne l'optimisation de l'usage des ressources de calcul mais aussi l'exploitabilité des résultats. En effet, si le domaine choisi est trop grand, on se prive de la possibilité de le mailler finement, ce qui est préjudiciable à la précision des résultats. À l'inverse, si le domaine est trop restreint, des informations im-

portantes peuvent être perdues. C'est le cas si un tunnel n'est modélisé que partiellement et que la fumée vient à sortir de la zone modélisée.

La délimitation du domaine de calcul est donc une étape cruciale qui doit être correctement justifiée, en tenant compte du problème physique étudié, du comportement général attendu de l'écoulement, et de certaines contraintes liées aux modèles physiques et numériques employés.

3.2.3 Le maillage et les sous-modèles

Le maillage⁶ est la décomposition du domaine physique en un grand nombre de cellules ou mailles. La forme de ces mailles est variable. Les deux types de maillage les plus courants sont le maillage hexaédrique (cellules à 6 faces, souvent des parallélépipèdes) et le maillage tétraédrique (cellules pyramidales à 4 faces). Dans le cas des tunnels, le maillage hexaédrique est le plus courant car dans une géométrie allongée, il permet de minimiser le nombre de cellules pour une même qualité de résultat numérique. Le nombre de mailles varie de quelques centaines de milliers à plusieurs millions. Ce nombre est le principal paramètre influençant le coût du calcul, c'est-à-dire sa durée et les ressources informatiques mobilisées. Pour obtenir un résultat réaliste, il est évidemment préférable d'utiliser un maillage le plus fin possible. Cependant, les échelles géométriques des tunnels rendent difficile l'utilisation de mailles de moins de 10 cm d'arête pour des applications autres que la recherche académique.

Aucune information sur le comportement de l'écoulement n'est disponible à une échelle spatiale inférieure à celle de la maille. Les phénomènes se produisant à des échelles plus petites ne peuvent donc pas être décrits explicitement.

Or, plusieurs phénomènes importants, notamment la turbulence⁶, mais aussi la combustion et certains transferts de chaleur, se produisent à des échelles spatiales très diverses. Dans un écoulement turbulent, les dimensions des tourbillons vont de plusieurs dizaines de centimètres à quelques millimètres. Il est impossible en pratique de représenter explicitement tous ces tourbillons, mais leur comportement physique varie beaucoup en fonction de leur taille. La relation entre les phénomènes se produisant à grande et à petite échelles doit donc être présupposée, alors qu'en réalité elle peut être très variable suivant l'écoulement considéré, et même entre différentes régions d'un même écoulement.

C'est pourquoi les sous-modèles⁶ décrivant statistiquement des phénomènes tels que la turbulence ou la combustion doivent être choisis en fonction du problème étudié et des maillages réalisables, à la lumière de connaissances majoritairement empiriques. Pour les mêmes raisons, il est le plus souvent impossible de quantifier l'incertitude d'une modélisation 3D. Une expertise dans les domaines concernés est donc

indispensable pour construire une modélisation physique et numérique cohérente.

En ce qui concerne le maillage, une étape importante du processus est le test de sensibilité au maillage. Différents degrés de finesse du maillage doivent si possible être testés. Le maillage retenu devra garantir des résultats très proches de ceux qui auraient été obtenus avec un maillage plus fin. La limite d'acceptabilité d'un maillage donné dépendra du degré de précision recherché dans l'étude et des ressources disponibles.

Enfin, il faut noter que la création de la géométrie dans l'outil informatique, le maillage et les éventuels tests de sous-modèles peuvent représenter un volume de travail très conséquent dans des cas complexes.

3.2.4 Les conditions aux limites

Pour effectuer un calcul, le modèle nécessite de spécifier le comportement de l'écoulement aux limites du domaine de calcul. Il existe différents types de conditions aux limites⁶ : vitesse ou pression imposées, parois lisses ou rugueuses, etc.

Si les possibilités de conditions aux limites sont variées, il faut noter qu'aucune ne peut en pratique représenter parfaitement l'écoulement réel. L'influence des choix effectués doit être connue du modélisateur, au besoin en effectuant des tests préalables. Dans de nombreux cas, le fait d'éloigner la condition aux limites de la zone principale d'étude diminue la sensibilité des résultats vis-à-vis des choix faits pour cette condition aux limites. Cela permet d'utiliser des conditions « standard » si aucune donnée précise n'est disponible.

Les conditions aux limites ont une influence déterminante sur le résultat d'une simulation. La validité physique de la modélisation repose en grande partie sur elles. Le modélisateur doit donc connaître les conséquences de ses choix en la matière, se rapprocher au mieux de la réalité physique et appliquer des conditions aux limites cohérentes avec le choix du domaine de calcul et des sous-modèles.

3.2.5 Les termes sources et la représentation des foyers d'incendie

Le mode de représentation du foyer est évidemment important pour la qualité d'une simulation d'incendie. Il existe différentes méthodes plus ou moins réalistes. Il n'est cependant pas toujours nécessaire d'utiliser les méthodes les plus précises.

La méthode la plus simple consiste à représenter le foyer comme une simple **source de chaleur** de géométrie fixée,

éventuellement couplée à une source de polluant (recommandé pour analyser l'évolution de la toxicité et de la visibilité). Cette source est répartie dans l'espace autour du lieu de l'incendie. Il faut s'assurer que les températures atteintes restent physiquement réalistes. Si la source est trop « concentrée », des températures très élevées sont calculées, ce qui peut fausser le calcul des transferts de chaleur. Cette méthode présente l'avantage de réduire les temps de calcul, et s'avère généralement suffisante pour des études de désenfumage sur des domaines assez grands (quelques centaines de mètres). Elle est en revanche trop imprécise en ce qui concerne les températures à proximité du foyer.

On peut également employer un **modèle de combustion**. Celui-ci calcule les concentrations de combustible et de comburant en tout point du maillage et en déduit le dégagement de chaleur. Cette procédure alourdit considérablement le calcul (pour le cas particulier du logiciel *FDS*, voir annexe B). Elle ne devrait donc être employée que dans les cas où on cherche à prévoir de façon assez précise les températures au voisinage du foyer, par exemple pour évaluer les sollicitations thermiques sur une structure. Il faut également noter que la plupart des modèles de combustion ont été développés à l'origine pour des applications industrielles (moteurs à explosion, brûleurs, etc.) et non pour les incendies qui mettent en jeu des phénomènes physiques fort différents.

Dans la pratique, même en cas d'utilisation d'un modèle de combustion, **la puissance thermique d'un incendie ainsi que la production de toxiques et de suies doivent être spécifiées a priori**. Il serait irréaliste, avec les connaissances et moyens actuels, de vouloir évaluer ces grandeurs par la modélisation à partir de la composition physico-chimique du foyer (type de véhicule, dimensions et chargement par exemple) ; cela pourrait conduire à des erreurs grossières. Le modèle de combustion permet essentiellement d'affiner la prédiction de la forme des flammes, et donc de la répartition des températures.

3.2.6 Régime permanent ou régime transitoire

Un incendie est un événement au cours duquel les conditions varient fortement. Il semble donc naturel de réaliser des simulations en régime transitoire⁶. Cependant, ces simulations sont très longues et coûteuses. Il peut être intéressant de se limiter à des simulations en régime permanent⁶, par exemple pour le dimensionnement d'un système de ventilation, pour lequel la

situation la plus pénalisante sera celle de l'incendie pleinement développé. Des méthodologies spécifiques incluant les deux types de simulation peuvent aussi être appliquées.

Notons que le logiciel *FDS* ne permet pas de réaliser de calculs en régime permanent en raison de la modélisation de la turbulence utilisée, qui est par nature transitoire. On peut toutefois appliquer des conditions aux limites indépendantes du temps et laisser l'écoulement se développer jusqu'à atteindre un état sensiblement stationnaire⁶.

Pour les simulations d'écoulements à l'extérieur d'un tunnel, les situations étudiées sont généralement stationnaires (les conditions aux limites ne dépendent pas du temps). Le régime permanent est alors mieux adapté.

3.2.7 Applications spécifiques

Les modèles de type 3D sont en théorie aptes à simuler n'importe quel écoulement de fluide. Dans le cas des tunnels, l'application la plus classique est la simulation d'incendie à l'intérieur d'un tunnel, pour laquelle des pratiques de modélisation ont été développées depuis de nombreuses années. Les modèles de calcul sont cependant de plus en plus souvent appliqués à des situations plus complexes, telles que l'étude du comportement aérodynamique d'un tunnel en fonction du vent extérieur, la dispersion de polluants au voisinage d'un tunnel routier, etc. Ces études sont très utiles, d'autant que les phénomènes en jeu sont moins bien connus qualitativement que le comportement des fumées d'incendie. Elles ne relèvent cependant pas encore de la pratique courante et nécessitent donc des compétences particulières. Le maître d'ouvrage devra être particulièrement attentif au choix du prestataire et à la justification des choix de modélisation. Il est particulièrement judicieux qu'il recoure à une assistance extérieure dans de tels cas.

4

CRITÈRES DE CHOIX ET COMPLÉMENTARITÉS ENTRE LES MODÈLES

4.1 CRITÈRES DE CHOIX ENTRE LES MODÉLISATIONS 1D ET 3D

Dans la pratique, la modélisation 1D, associée à une bonne connaissance physique des incendies en tunnel, est souvent suffisante pour dimensionner un système de ventilation. Dans le cas de systèmes innovants, de géométries spécifiques, etc., le recours à la modélisation 3D permet de compléter l'analyse. Concernant les études de dangers, la modélisation 3D apporte généralement une meilleure précision en donnant des indications sur l'état de stratification des fumées et en calculant de façon fiable le déplacement des fronts de fumée. Cependant, en fonction de la géométrie de l'ouvrage, du système de ventilation et de la précision des hypothèses des autres modèles (d'évacuation notamment), une modélisation 1D peut suffire. Il existe enfin des études pour lesquelles seule une modélisation 3D sera adaptée (étude du comportement d'une tête de tunnel par exemple).

Le critère de choix entre les modèles 1D et 3D n'est pas toujours directement lié à la stratégie de ventilation (longitudinale

ou transversale). En ventilation transversale, la stratégie de ventilation est certes fondée sur la stratification des fumées, qui ne peut être modélisée que par un outil 3D. Cette représentation n'est cependant pas toujours nécessaire. Ainsi, s'il s'agit uniquement d'examiner la faisabilité d'un contrôle du courant d'air, une modélisation 1D suffit, et donnera probablement des résultats plus fiables. L'optimisation de la configuration géométrique des trappes de désenfumage, en revanche, nécessite un modèle 3D.

Il est donc nécessaire d'examiner les phénomènes physiques importants pour le problème considéré, et non uniquement les caractéristiques de l'ouvrage, pour choisir le type de modélisation le plus approprié.

Le Tableau 1 page suivante récapitule les modèles le plus souvent utilisés pour les différents types d'études.

4.2 UTILISATION COMPLÉMENTAIRE DES DEUX TYPES DE MODÈLES

Dans la majorité des cas, et particulièrement pour les études de dangers, le meilleur compromis entre la qualité des résultats et les ressources utilisées sera atteint en combinant les deux types de modélisation. Par exemple, le comportement aérodynamique général d'un tunnel peut être étudié de manière rapide et fiable au moyen d'un modèle 1D. Un grand nombre de scénarios peuvent être analysés, et une bonne connaissance de la physique permettra de qualifier ces cas (acceptable, inacceptable, incertain). Les incertitudes dans les cas identifiés comme problématiques peuvent être liées à la stratification des fumées, à leur confinement ou encore à l'efficacité de l'extraction. La modélisation 3D peut alors intervenir pour les lever.

L'intérêt d'une étude 1D complète avant toute utilisation d'un modèle 3D est double : elle permet de restreindre l'étude 3D

aux cas qui le nécessitent réellement ; elle peut aussi fournir rapidement des conditions aux limites fiables pour la simulation 3D, permettant de réduire les dimensions du domaine de calcul et d'optimiser la convergence numérique. Le gain de temps, d'argent et l'amélioration de la qualité des résultats peuvent être considérables.

Dans tous les cas, notamment les plus « classiques », il est important de se poser la question de la valeur ajoutée potentielle des simulations 3D avant de les réaliser. Des informations de qualité comparable peuvent parfois être obtenues par des méthodes moins onéreuses.

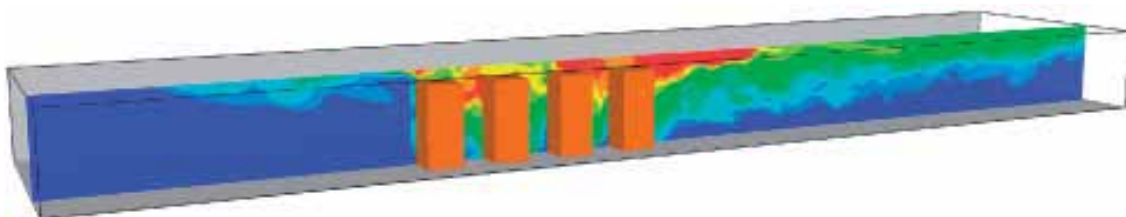


Figure 3 : Exemple de résultat 3D : champ de température au voisinage d'un foyer. La connaissance précise des températures en plafond ne peut être obtenue que par simulation tridimensionnelle.

Problème étudié	1D	3D
Dimensionnement du système : accélérateurs ou débits de ventilation		
En ventilation longitudinale	✓	
En ventilation transversale	✓ (a)	
Définition de scénarios de base pour la ventilation sanitaire et le désenfumage	✓	
Optimisation du système de ventilation		
Positionnement longitudinal des accélérateurs	✓	
Optimisation fine de scénarios de désenfumage		✓
Géométrie des trappes d'extraction (non courant)		✓
Optimisation fine des débits pour le cantonnement des fumées (non courant)		✓
Positionnement transversal des accélérateurs, amélioration de l'efficacité (non courant)		✓
Études de dangers		
Ventilation longitudinale, dans un scénario où le contrôle du courant d'air n'est pas recherché	✓ (b)	✓
Ventilation transversale, ou ventilation longitudinale dans un scénario où le contrôle du courant d'air est recherché		✓
Reconstitution de sinistres		
Reconstitution de scénarios de ventilation	✓	
Reconstitution des conditions pendant l'incendie		✓
Ingénierie de la sécurité incendie (résistance au feu des structures)		
Calcul de sollicitations thermiques sur les structures (c)		✓ + combustion
Impact sur l'environnement et les ouvrages voisins		
Dispersion de polluants en tête de tunnel, de fumées, recyclage entre tubes ou entre tunnels voisins		✓

(a) Dans ce cas, la modélisation est généralement utilisée pour dimensionner les dispositifs de contrôle du courant d'air.

(b) Les valeurs moyennes sur la section (toxicité, opacité) ne donnent généralement pas une évaluation suffisante des conditions à hauteur d'homme pour les scénarios où des usagers peuvent se trouver dans les fumées (trafic congestionné, vitesse d'air inférieure à la vitesse critique).

(c) Pour les applications possibles de cette démarche qui dépasse le cadre de la modélisation aérodynamique, voir CETU, *Compléments au guide « Comportement au feu des tunnels routiers »*, mars 2011, paragraphe 1.4.

Tableau 1 : Famille de modèle à utiliser préférentiellement pour les différents types d'études réalisées en tunnel, sauf cas particuliers liés à la nature, la fonction ou la complexité de l'ouvrage. Une étude 1D est toujours conseillée avant toute modélisation 3D.

DISPOSITIONS CONTRACTUELLES À ENVISAGER

Quel que soit le modèle employé, une étude numérique de ventilation n'est donc fiable que si elle est réalisée par des personnes compétentes dans le domaine, suivant une méthodologie rigoureuse, et si les choix techniques sont adaptés à la configuration de l'ouvrage et aux objectifs de l'étude elle-même. Plusieurs types de dispositions dans la formulation de la commande peuvent permettre d'améliorer la fiabilité des études.

5.1 RÉDACTION DU CAHIER DES CHARGES DE L'ÉTUDE

La commande peut apporter certaines précisions quant aux objectifs de l'étude, mais aussi aux outils employés. Il convient, avant de lancer une étude, de définir précisément les questions qui se posent. C'est ensuite la nature exacte des phénomènes les plus déterminants au regard des questions posées, plus que le type de ventilation par exemple, qui permettra de choisir l'outil adapté. Le fait de définir au stade de la consultation un outil privilégié, ou de préciser des exigences méthodologiques,

permet d'obtenir des offres plus facilement comparables sur les plans technique et financier. Il faut en effet décourager les candidats potentiels de proposer des simulations 3D peu instructives en regard de leur coût, mais pouvant être attractives pour le maître d'ouvrage du fait de leur supposée supériorité technique. Il est préférable d'insister sur la méthodologie d'étude.

5.2 CONTRÔLE QUALITÉ

Toute modélisation nécessite un certain nombre d'hypothèses qui peuvent avoir une grande influence sur les conclusions de l'étude. L'interprétation des résultats doit également être effectuée avec rigueur. Afin de garantir cela, plusieurs types d'exigences peuvent être formulées :

- Rédaction, avant tout calcul, **d'une note comportant la justification de l'outil utilisé et des hypothèses de la modélisation**. On trouvera des listes types dans les guides du CETU consacrés aux deux familles de modèles¹.
- **Vérification du détail des calculs** par une personne compétente en modélisation, appartenant au personnel du prestataire mais différente de celle qui réalise l'étude (contrôle externe).
- Présentation des résultats de calcul bruts, rédaction d'une **note méthodologique sur leur interprétation** et d'une note de conclusions.

Pour tous les calculs en tunnel, il est fortement recommandé de demander que soient inclus dans les rapports l'évolution spatiale et temporelle de la **vitesse longitudinale moyenne de l'air** dans le tunnel. Ce résultat permet de vérifier immédiatement la cohérence de la simulation avec le scénario étudié.

¹ : Pour les études 3D, voir fascicule 3 du présent guide (à paraître) ou *Guide des dossiers de sécurité*, fascicule 4 — « Les études spécifiques des dangers » (CETU, 2003), annexe D, section D.3 qui fournit une liste applicable à tout calcul 3D, y compris hors du cadre des ESD des tunnels routiers.

CONCLUSIONS

La modélisation numérique des mouvements d'air dans les tunnels et leur environnement proche est devenue incontournable, notamment pour ce qui concerne la sécurité incendie. Elle reste cependant un sujet techniquement complexe.

Deux grandes familles de modèles cohabitent : les modèles 1D et les modèles 3D. Chacune offre des possibilités différentes. Il faut donc choisir l'outil le mieux adapté, et dans de nombreux cas une utilisation complémentaire des deux types de modèles est susceptible de donner le meilleur rapport coût/résultats.

Les modèles 1D ne représentent pas la stratification des fumées, ce qui constitue souvent une limitation importante dans le cadre d'études de scénarios d'incendie (comme pour les études spécifiques des dangers des tunnels routiers). En revanche, ils suffisent généralement pour le dimensionnement des systèmes de ventilation. Ils restent également le seul outil raisonnablement utilisable pour réaliser des études paramétriques incluant de nombreux scénarios, ainsi que pour prendre en compte des phénomènes difficiles à modéliser en 3D comme l'influence du trafic. Une bonne connaissance de la physique de l'incendie en tunnel permet de conclure au moins qualitativement sur le niveau de sécurité pour une grande partie des scénarios. Malgré leurs limitations théoriques, les modèles 1D offrent des possibilités qui ne doivent donc pas être sous-estimées.

Les modèles 3D complètent utilement une étude 1D lorsqu'une incertitude subsiste sur un phénomène particulier, notamment la stratification des fumées lorsqu'elle est importante pour la sécurité des usagers. Le processus de modélisation est cependant complexe. De nombreux choix doivent être effectués et peuvent fortement influencer le résultat final. De ce fait, la fiabilité des résultats est souvent plus difficile à évaluer en 3D qu'en 1D. Il est important que le prestataire soit en mesure de justifier la pertinence de ses choix au regard du problème étudié. Le maître d'ouvrage pourra utilement faire appel à l'assistance d'une expertise extérieure spécifique.

En outre, la progression des connaissances phénoménologiques, associée aux incertitudes inhérentes à la modélisation 3D, fait que la valeur ajoutée de simulations 3D pour des scénarios « classiques » (incendie standard dans une géométrie usuelle) peut s'avérer faible. Les ressources humaines et financières utilisées pour de telles simulations pourraient parfois être employées à des travaux plus riches en enseignements, comme des études de sensibilité à l'aide d'un modèle 1D.

Les modèles 3D sont également de plus en plus employés pour étudier les interactions entre le tunnel et son environnement (influence météorologiques sur les mouvements d'air en tunnel ; dispersion des polluants rejetés par un tunnel routier dans son environnement proche). Ces études spécifiques sont le plus souvent utiles mais également très délicates en raison du manque de recul et de « bonnes pratiques » documentées. Le niveau de compétence du prestataire est crucial pour la réussite de l'étude, et une assistance au maître d'ouvrage par une expertise extérieure d'autant plus utile.

ANNEXES

ANNEXE A – LE LOGICIEL CAMATT

CAMATT est l'acronyme de *C*Alcul *M*onodimensionnel *A*niso-*t*herme *T*ransitoire en *T*unnel. Il s'agit d'un outil de modélisation 1D des écoulements en tunnel diffusé par le CETU.

Il prend notamment en compte l'échauffement des parois au cours de l'incendie, phénomène qui mène à l'augmentation des températures en tunnel, et n'est pas toujours pris en compte par les modèles 1D.

CAMATT est aujourd'hui le logiciel 1D le plus utilisé en France. Certains bureaux d'études ont cependant développé des outils internes aux performances comparables. Comme pour tout modèle, l'emploi d'un outil bien connu de l'utilisateur est toujours préférable tant que des performances minimales du modèle sont garanties. Ces performances minimales sont mentionnées dans le fascicule 2 du présent guide.

ANNEXE B – LE LOGICIEL FDS

Fire Dynamics Simulator ou *FDS* est le nom d'un logiciel de calcul 3D spécifiquement dédié à la simulation d'incendie. Cet outil a été développé par le NIST (National Institute of Standards and Technology), une agence gouvernementale américaine. Il est devenu en quelques années le logiciel le plus utilisé dans le domaine de l'incendie à travers le monde. Ce succès s'explique par plusieurs raisons :

- Le logiciel est dans le domaine public et donc disponible gratuitement sur Internet².
- Il est assez facile à prendre en main.
- Les calculs sont rapides.
- Il est couplé à un outil de visualisation assez performant (*Smokeview*).
- Son code est ouvert et personnalisable.
- Il existe un important réseau d'utilisateurs et de nombreux cas de validation sont disponibles.

Ces avantages sont obtenus au prix de certains inconvénients :

- La géométrie est limitée à des formes parallélépipédiques.
- Pour les phénomènes de turbulence, rayonnement et combustion, un seul modèle est disponible.
- Le calcul en régime permanent n'est pas disponible.
- Les méthodes numériques employées sont moins précises que celles des outils « industriels ».

Il est important de noter que *FDS* est au départ un outil dédié à la simulation d'incendies en bâtiment et optimisé pour de tels cas. Testé sur des cas académiques d'incendie en tunnel, il a donné des résultats tout à fait acceptables par rapport à des outils de calcul « industriels »³. Il faut cependant rester prudent dans la réalisation d'études moins classiques. La simulation d'écoulements à l'extérieur d'un tunnel, en particulier, est très éloignée du domaine d'utilisation initial de *FDS*.

Il faut également noter que *FDS* utilise une modélisation de la turbulence particulière qui impose certaines contraintes, notamment en termes de maillage. Il utilise aussi par défaut un modèle de combustion spécifique, qui alourdit très peu le calcul mais nécessite certaines précautions d'emploi.

L'expérience montre que les principaux avantages de *FDS*, à savoir son coût nul et sa facilité de prise en main, sont aussi ses principaux défauts car des utilisateurs insuffisamment compétents en matière de simulation numérique peuvent réaliser des calculs dont les résultats seront physiquement plausibles, mais en réalité peu fiables sur le plan quantitatif.

² : <http://fire.nist.gov/fds>

³ : Voir A. Rahmani, *Simulation des Grandes Echelles pour les incendies en tunnel routier*, thèse de doctorat de l'université Claude Bernard Lyon 1, 2006.

GLOSSAIRE

Condition aux limites

Condition mathématique imposée aux limites spatiales du domaine de calcul. Ces conditions sont nécessaires pour résoudre numériquement ou analytiquement les équations.

Maillage

L'ensemble des points de l'espace sur lesquels une solution approchée des équations du modèle est recherchée. Ces points sont appelés nœuds de calcul. Un maillage plus fin, c'est-à-dire des nœuds plus rapprochés, permet généralement une meilleure précision de la résolution numérique.

On parle parfois de maillage temporel, qui est l'ensemble des instants auxquels la solution approchée est calculée.

Modèle numérique

Outil permettant le calcul approché de grandeurs physiques. Le modèle numérique décrit la réalité en la simplifiant. Les hypothèses physiques, c'est-à-dire relatives à la nature des phénomènes jugés *a priori* significatifs pour le problème considéré, débouchent sur une description de la réalité au travers d'équations mathématiques. Ces équations peuvent être simplifiées au moyen d'hypothèses mathématiques (par exemple, sur l'importance relative de certains termes), qu'il est parfois possible d'interpréter en termes physiques. Enfin, si les équations ne peuvent pas être résolues analytiquement (ce qui est généralement le cas en mécanique des fluides), on en effectue une résolution approchée sur un nombre fini de points d'espace et en un nombre fini d'instantanés par des techniques mathématiques désignées par le terme « analyse numérique ». Ce procédé introduit une certaine imprécision.

Régime permanent

Caractéristique d'un écoulement dont les variables (vitesse, température, etc.) ne dépendent pas du temps. Lorsque l'évolution temporelle d'un écoulement est négligeable ou n'est pas l'objet de l'étude, faire l'hypothèse d'un régime permanent permet de ne résoudre qu'une seule fois les équations du modèle.

On rencontre parfois l'expression « régime stationnaire ». Pour éviter toute confusion, nous n'utilisons pas cette expression dans ce guide et réservons l'adjectif « stationnaire » aux variables d'entrée de la modélisation (voir ci-dessous).

Régime transitoire

Par opposition au régime permanent, caractéristique d'un écoulement dont les variables évoluent dans le temps. Simuler un écoulement en régime transitoire nécessite de résoudre les équations pour chaque instant représenté, d'où un temps de calcul beaucoup plus élevé qu'en régime permanent.

Sous-modèle

Ensemble d'équations algébriques ou différentielles décrivant l'un des phénomènes à l'œuvre au sein de l'écoulement modélisé. Les principaux sous-modèles concernent la turbulence, la chimie (dont la combustion) et les transferts de chaleur.

Stationnaire

Se dit d'une variable d'entrée (condition aux limites en particulier) de la modélisation qui ne varie pas dans le temps (synonyme : constant dans le temps). Un écoulement dont les conditions aux limites sont stationnaires n'est pas nécessairement en régime permanent. La propagation du front de fumée issu d'un incendie de puissance stationnaire est un contre-exemple typique.

Turbulence

Phénomène d'instabilité généralisée d'un écoulement qui apparaît au-delà d'une certaine vitesse ou d'une certaine échelle spatiale de l'écoulement. Pour les écoulements d'air en tunnel et les écoulements atmosphériques, la turbulence est toujours présente. Elle se caractérise par la formation aléatoire de tourbillons de tailles variées. Le phénomène et ses effets sur l'écoulement (mélange, perte d'énergie) peuvent en théorie être décrits de manière statistique mais ils dépendent fortement du problème considéré.

ONT CONTRIBUÉ À CE DOCUMENT :

Antoine Mos, Jean-François Burkhart,
Didier Lacroix

Ressources, territoires, habitats et logement
Énergies et climat Développement durable
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

**Présent
pour
l'avenir**

Centre d'Études des Tunnels
25, avenue François Mitterrand
Case n°1
69674 BRON - FRANCE
Tél. 33 (0)4 72 14 34 00
Fax. 33 (0)4 72 14 34 30
cetu@developpement-durable.gouv.fr

