Zeitschrift: Tracés : bulletin technique de la Suisse romande
Herausgeber: Société suisse des ingénieurs et des architectes
Band: 134 (2008)
Heft: 15-16: Montrer le m2

Artikel: Simulation aéraulique et ventilation
Autor: Mossi, Michele
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-99695

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 21.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Michele Mossi

Simulation **aéraulique** et ventilation

Le projet initial du métro m2 ne prévoyait pas de couvrir la quasi totalité du tracé comme aujourd'hui, et il n'était pas prévu d'équiper les tunnels d'un système de ventilation pour extraire les fumées en cas d'incendie. Cette conception initiale avait pour hypothèse que, compte tenu de la pente de la ligne, l'effet cheminée serait suffisant pour évacuer naturellement les fumées vers le portail haut du tunnel, sans aucun moyen mécanique.

Bien que l'incendie d'une rame soit fort improbable, un tel événement peut avoir des conséquences dramatiques en terme de pertes de vies humaines. Il était donc indispensable de vérifier l'efficacité d'une ventilation naturelle (c'est-à-dire sans moyens mécaniques actifs) avant la finalisation des travaux de génie civil, afin d'éventuellement modifier le projet en évitant de pénaliser le planning global. Cette vérification a été rendue encore plus nécessaire à la suite du choix de couvrir d'importantes parties du tracé initialement prévues à l'air libre.

Pour la réalisation de cette vérification, le recours à la simulation numérique couplée avec une démarche d'analyse de risque quantifiée a été indispensable. Cette démarche a permis de détecter une faille dans les hypothèses retenues dans le projet initial, et entraîné l'installation d'équipements de ventilation dans les tunnels pour un coût raisonnable par rapport au risque potentiel. L'étude qui a abouti à cette conclusion et au choix des équipements et des stratégies de ventilation a été réalisée en quatre étapes principales.

Observations météorologiques

Tout d'abord, de simples constatations météorologiques accompagnées de quelques simulations numériques monodimensionnelles ont montré que l'écoulement naturel de l'air dans les tunnels du métro m2 ne se faisait pas systématiquement d'Ouchy vers Croisettes : dans bien des cas, la différence de pression entre les portails et la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du tunnel généraient une circulation descendante, en direction du lac, ceci avec des vitesses proches de 2 m/s[1].

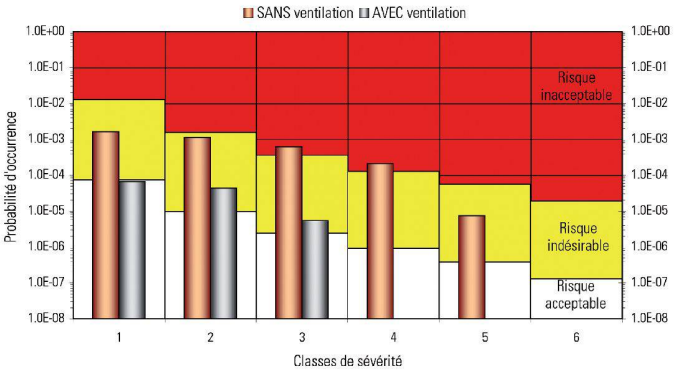
Ce premier constat est à l'origine du lancement d'une étude plus poussée des phénomènes aérauliques en cas d'incendie : il était en effet impossible d'affirmer que, dans tous les cas de figure, les fumées d'un éventuel incendie se dirigeraient immédiatement vers le portail supérieur du tunnel, laissant ainsi libre la partie inférieure pour l'évacuation des passagers.

Simulations d'incendies

L'étude aéraulique détaillée, couplée à une analyse de risque feu-fumées, constitue la deuxième étape du projet de ventilation. C'est elle qui a permis de quantifier les véritables avantages en terme de sécurité de l'installation d'équipements de ventilation, avec comme conséquence la décision d'installer de tels équipements.

Pour cette étape, on a procédé à la simulation numérique de scénarios d'incendie, en reproduisant fidèlement la géométrie des tunnels, des stations et des véhicules, mais

[1] A noter que les plus incrédules n'ont été véritablement convaincus de ce résultat numérique qu'après une confirmation expérimentale sans équivoque. En effet, le parfum d'une raclette servie à la station Ours lors d'une fête a été perçu vers la sortie Bessières du tunnel, située quelques dizaines de mètres plus bas, confirmant ainsi l'existence d'un écoulement naturel vers le bas ce soir là.



1

Fig. 1 : Comparaison des matrices de risque pour les quatre tunnels du m2 sans ou avec équipements de ventilation. La gravité est représentée par six classes de sévérité. La probabilité d'occurrence mesure la fréquence d'un événement, à savoir le nombre d'occurrences par année d'exploitation.

Fig. 2 : Simulation numérique 3D d'un incendie où le véhicule en feu est arrêté dans la station Ouchy. Dans le cas présent, le système de ventilation fonctionne en mode dégradé avec un seul ventilateur en extraction.

sans considérer des éventuels équipements de ventilation. Les scénarios simulés comprenaient :

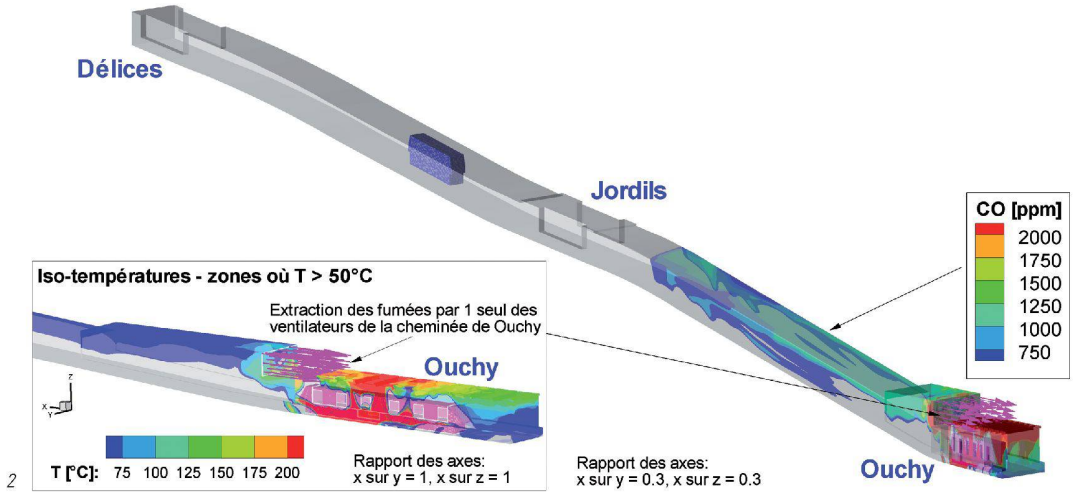
- le développement d'un incendie sur un véhicule en mouvement,
- l'arrêt de ce véhicule, soit à la station la plus proche, soit en plein tunnel (en fonction de la gravité de l'incendie),
- l'arrêt des autres véhicules en circulation selon le concept de sécurité prévu,
- le développement de l'incendie et la propagation des fumées le long du tunnel en fonction du courant d'air initial et de l'effet cheminée (fumées chaudes ascendantes),
- l'évacuation vers une station des passagers des véhicules arrêtés en plein tunnel.

Pour l'étude d'évacuation, la fuite de chacun des 222 passagers occupant chaque véhicule a été simulée en considérant une vitesse de fuite calculée dynamiquement, selon la concentration locale des fumées dans le tunnel. La probabilité de survie d'un passager en fuite a été calculée en fonction du temps d'exposition aux gaz toxiques produits par l'incendie et de leurs caractéristiques (température, concentration, toxicité). Toutes les simulations numériques de cette étape ont été réalisées selon une approche monodimensionnelle.

Pour que l'analyse de risque soit aussi exhaustive que possible, quelque 1200 scénarios d'incendie ont été envisagés pour les quatre tunnels de la ligne m2 (Ouchy-Délices, Grancy-Riponne, Bessières-CHUV et Sallaz-Croisettes). Ces scénarios se distinguent par la position d'arrêt du véhicule en feu (en station ou en plein tunnel), la cinématique des véhicules en circulation, la puissance thermique de l'incendie ainsi que les conditions atmosphériques. Ensuite, chaque scénario d'incendie a été combiné avec cinq scénarios de fuite des passagers, conduisant donc à un total de quelque 6000 simulations. Afin de compléter l'analyse de risque, chacune d'entre elles a été quantifiée en termes de « gravité » (exprimée en nombre de victimes) et de « probabilité d'occurrence » (exprimée en nombre d'accidents par année d'exploitation). Il est évident que ces 6000 scénarios n'auraient pas pu être étudiés sans le recours à la simulation numérique[2].

Les résultats des scénarios ont ensuite été regroupés selon leur gravité en « classes de sévérité ». Ils ont alors été représentés sous forme d'une matrice de risque pour être comparés aux courbes d'acceptation du risque admises pour le projet m2. Le risque est une variable bidimensionnelle, exprimé en fonction de la gravité d'un événement et de sa probabilité d'occurrence. La conclusion de l'étude est illustrée sur la figure 1, où l'on voit que la ventilation naturelle n'est pas suffisante pour que le niveau de risque reste dans les limites acceptées : des points figurent non seulement dans la zone de risque indésirable, mais aussi dans la zone de risque inacceptable. Il était donc indispensable de prendre des mesures de réduction du risque. La plus efficace était le recours à une ventilation mécanique accompagnée d'une gestion appropriée de la fuite des passagers.

Après avoir réalisé un dimensionnement préliminaire des équipements de ventilation[3], l'ensemble de la démarche de simulation a été répété en intégrant un système de ventilation actif, capable de contrôler le sens de propagation des fumées et d'extraire ces dernières par l'un des deux portails de chaque tunnel. Le résultat final était sans équivoque : un système de ventilation *ad hoc* permettait de réduire consi-



2

Fig. 3 : Diverses situations des trains en cas d'incendie

Fig. 4 : Comparaison entre mesures expérimentales et résultats numériques de la vitesse de l'air dans le tunnel Sallaz-Croisettes lors du démarrage progressif de 14 accélérateurs. Les valeurs expérimentales ont été mesurées par des capteurs fixés en voûte du tunnel.

dérablement le risque (globalement de deux ordres de grandeur par classe de sévérité), faisant disparaître tous les points caractérisant un risque inacceptable (fig. 1).

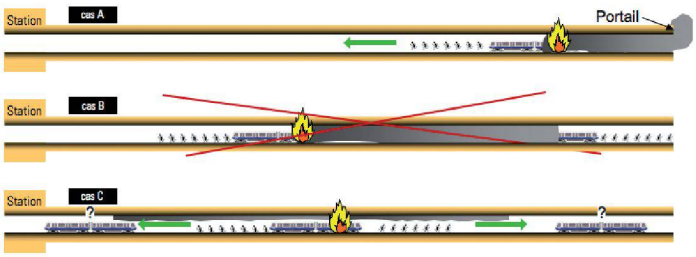
Dimensionnement du système

La décision d'installer une ventilation mécanique prise, l'étape suivante consistait à optimiser certains choix effectués lors de la deuxième étape et à définir, pour les divers scénarios d'incendie, les stratégies appropriées d'extraction des fumées et de fuite des passagers. On a ainsi défini 51 stratégies différentes pour l'ensemble du tracé. En cas d'incendie, la stratégie optimale est sélectionnée par l'opérateur, en fonction de la position des véhicules dans le tunnel sinistré et mise en œuvre par un système de gestion intelligent.

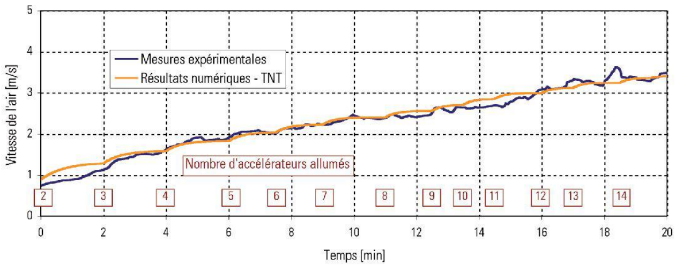
La définition de ces stratégies a fixé les contraintes les plus sévères que devait satisfaire le système de ventilation. Celui-ci devait être conçu pour savoir répondre à deux régimes distincts, au fur et à mesure de l'évolution de l'incendie d'une rame :

- il doit savoir contrôler dynamiquement la vitesse de l'air dans le tunnel autour d'une valeur faible, proche de 0 m/s ; un tel contrôle est nécessaire pour permettre aux fumées de se stratifier en voûte du tunnel, en laissant la partie inférieure libre pour la fuite des passagers ;
- il doit également savoir créer un courant d'air supérieur à 2 m/s dans l'une ou l'autre des directions ; une telle vitesse est nécessaire pour repousser complètement les fumées d'un seul côté de l'incendie et laisser l'autre libre pour la fuite des passagers.

Ces deux régimes de fonctionnement sont dictés par les caractéristiques particulières du métro. En effet, le tunnel étant bidirectionnel, il existe une probabilité très faible, mais non nulle, que le véhicule incendié se retrouve arrêté en pleine voie et que son arrêt engendre celui d'un deuxième véhicule dans un même tronçon de tunnel entre deux stations (fig. 3). Ne pouvant connaître précisément la position d'arrêt de ce deuxième véhicule, l'opérateur ne sait pas si celui-ci se trouve en amont ou en aval du véhicule incendié (cas C). Dans ce cas, il ne peut pas courir le risque d'enfumer les passagers du véhicule sain pour libérer des fumées la voie de fuite des passagers du véhicule incendié (cas B2). Le système de ventilation agit alors en créant et en maintenant les conditions nécessaires à la stratification des fumées en voûte du tunnel, afin de permettre aux passagers des deux véhicules de trouver des conditions de fuite acceptables (cas C). Pour ce faire, le système de contrôle-commande règle en continu la vitesse de l'air dans le tunnel et, pour maintenir toujours cette vitesse dans la plage définie, allume ou éteint des accélérateurs selon une liste bien précise. Lorsqu'il n'y a pas un deuxième véhicule arrêté (cas A) dans le tronçon entre le véhicule incendié et le portail le plus proche, le système de ventilation pousse les fumées vers le portail, libérant complètement la voie de fuite dans le sens opposé.



3



4

Ici encore, pour dimensionner correctement le système de ventilation et en évaluer l'efficacité, la simulation numérique a été déterminante. Elle a permis de calculer la puissance aéraulique nécessaire, de sélectionner les machines à installer et finalement de positionner les 52 accélérateurs, les cinq ventilateurs et les 21 anémomètres et thermomètres qui composent le système de ventilation. L'avantage des simulations numériques tient à leur grande souplesse, puisqu'elles peuvent prendre en considération les conditions météorologiques les plus sévères, l'état final de l'infrastructure et la circulation prévue des trains, ceci bien avant l'achèvement des travaux de génie civil. La simulation a encore permis de décrire en trois dimensions le comportement

[2] L'ensemble des simulations a requis quelque 2000 heures de calcul, soit 20 jours avec quatre processeurs Pentium IV de 3.0 GHz.

[3] A ce stade, soit en été 2005, le projet m2 était déjà très avancé dans son ensemble et, surtout, plus de 60% des ouvrages avaient déjà été excavés. Ainsi, seules des solutions de ventilation basées essentiellement sur l'installation d'accélérateurs en voûte pouvaient encore être retenues pour réduire le risque feu-fumées. D'autres solutions – dont celle, classique, qui consiste à équiper chaque station de puits de désenfumage mécanisés – étaient désormais devenues pratiquement irréalistes.

Fig. 5 : Essai incendie réalisé le 27 février 2008 à proximité de la station Sallaz
(Tous les documents ont été fournis par l'auteur.)

des fumées pour les stratégies difficilement reproductibles expérimentalement[4] (fig. 2).

Le projet a reposé sur des calculs monodimensionnels (1D), réalisés avec le logiciel TNT développé par *GESTE Engineering*, ainsi que sur des calculs en trois dimensions (3D) effectués avec le logiciel FLUENT produit par *Ansys*. Pour les deux approches, le réseau de tunnels est modélisé précisément selon sa géométrie longitudinale (longueur et pente). En 1D, on ne considère pas la forme de la section transversale, mais uniquement sa surface et son périmètre, tandis qu'en 3D on reproduit fidèlement l'ensemble de l'ouvrage (fig. 2). Les temps de calcul des deux approches varient bien sûr considérablement. Si l'approche 1D nécessite quelques minutes, voire quelques secondes, un calcul selon une approche 3D peut durer plusieurs jours, voire plusieurs semaines, en fonction de l'ampleur du domaine de calcul et du nombre de minutes que l'on veut simuler.

Vérification expérimentale

Faisant suite à l'installation des équipements de ventilation et des serveurs de contrôle-commande, la dernière étape du projet de ventilation consistait à effectuer une vérification expérimentale des choix de dimensionnement et des stratégies retenues. Une vaste campagne de tests a permis d'observer le fonctionnement aéraulique des 51 stratégies de désenfumage dans les conditions réelles, mais bien entendu en l'absence de véhicules en feu. Ces tests ont confirmé avec succès les résultats obtenus préalablement par voie numérique (fig. 4).

Cette campagne a été complétée par cinq tests d'incendie en conditions réelles où les fumées produites par le feu d'une rame étaient remplacées par des fumées froides émises par des fumigènes à 50°C. Ces essais ont permis de reproduire l'effet induit par la présence de fumées dans les tunnels et de vérifier in situ les conditions de visibilité et la propagation des fumées le long des chemins de fuites et en station (fig. 5). Dans ce cas également, l'accord entre simulations numériques et essais expérimentaux s'est révélé excellent.

Le métro m2 est ainsi équipé d'un système de ventilation tunnel efficace, dont la performance a été validée numériquement et expérimentalement. Ce système permet, en cas d'incendie, de libérer les voies de fuite et de les maintenir sans fumées pour une évacuation optimale des passagers.

Michele Mossi, dr, ing. phys. EPF,
GESTE Engineering SA
Parc scientifique PSE-C, CH – 1015 Lausanne

[4] Dans les cas extrêmes, une vérification expérimentale requerrait le recours à l'incendie réel d'une rame, une solution dont les impacts sur l'infrastructure seraient bien trop dangereux et conséquents, sans parler des coûts.

5