

VII.4 Résistance au feu des structures

VII.4.1 Généralités

La résistance au feu d'une structure peut être définie par le temps qui s'écoule entre le début d'un incendie et le moment où elle ne peut plus assurer sa fonction en raison d'une déformation inacceptable ou d'une rupture.

Conformément aux objectifs généraux de la maîtrise des incendies et des fumées énoncés au chapitre I (§ I.5), les objectifs de résistance au feu des structures des tunnels sont de :

- permettre l'évacuation des usagers,
- permettre les opérations de secours et de lutte contre l'incendie,
- limiter les dommages sur le génie civil du tunnel, sur ses équipements et sur les bâtiments voisins.

Les deux premiers objectifs sont liés à la sécurité, le troisième à la protection de l'ouvrage. Un objectif supplémentaire, fortement lié au troisième, est de :

- limiter le temps de fermeture à la circulation pour les travaux de réparation consécutifs à un incendie.

En ce qui concerne le délai toléré avant la défaillance de la structure d'un tunnel, la manière dont ces objectifs généraux sont traduits en exigences précises dépend des conséquences d'une défaillance : plus elles sont importantes, plus les exigences seront élevées. En conséquence, ces exigences dépendent :

- du type de tunnel (certains tunnels, comme par exemple, les tunnels immergés, les tunnels urbains peu profonds ou les tunnels dans des sols meubles ou bouillants, seront bien plus affectés par une rupture localisée que d'autres, comme les tunnels creusés dans la roche) ;
- du type de structure et de son rôle pour la sécurité et la protection des biens (par exemple, la dalle séparant le tunnel d'un immeuble proche doit être mieux protégée qu'une sortie de secours à l'air libre qui, de toute façon, ne peut pas être utilisée s'il y a des températures élevées à son entrée) ;
- du type de circulation autorisé dans le tunnel (selon qu'il n'y a que des véhicules particuliers, ou également des poids lourds, ou aussi des transports de marchandises dangereuses, la courbe température-temps utilisée pour vérifier la résistance au feu sera différente –voir chapitre II-, mais aussi l'incendie durera plus longtemps et peut nécessiter une durée plus longue avant rupture).

L'exigence de base est qu'une rupture localisée ne doit pas entraîner des effets généralisés à tout le tunnel. Des applications spécifiques de ce principe sont décrites dans les paragraphes qui suivent, mais, dans tous les cas, il y a deux conséquences :

- un effondrement en chaîne doit être évité, ce qui signifie que la défaillance d'une partie ne doit pas transférer de sollicitations à une partie proche et conduisant à la rupture de celle-ci, et ainsi de suite jusqu'à provoquer une réaction en chaîne ;

une rupture localisée ne doit pas couper un équipement longitudinal essentiel comme une alimentation électrique ou un câble de communication, une gaine nécessaire lors d'un incendie, etc. ; s'il n'est pas jugé nécessaire de protéger la totalité de la structure, alors ces équipements doivent être situés à un endroit où ils seront toujours à l'abri, par exemple dans une tranchée protégée sous le revêtement.

Les deux paragraphes qui suivent donnent des informations sur la résistance au feu des diverses structures et sur l'écaillage. Des recommandations sont ensuite données sur la résistance au feu de la structure principale et des autres éléments de génie civil.

VII.4.2 Diverses structures de tunnel

Différents matériaux sont utilisés en structure de tunnel et requièrent diverses précautions en matière de protection incendie.

Dans beaucoup de tunnels au rocher, le revêtement est en béton non armé. En cas d'incendie, il peut être endommagé en raison d'une mauvaise qualité, d'une formulation inadaptée, d'une épaisseur variable, etc.

Dans de nombreux autres cas, le soutènement en béton projeté est laissé apparent. Il peut être armé par un treillis métallique ou par divers types de fibres en acier ou en polymères. Des travaux complémentaires sont nécessaires pour acquérir une meilleure connaissance du comportement au feu de tels matériaux.

Mieux connu est le béton armé qui est utilisé dans les tunnels creusés au tunnelier, les tranchées couvertes, les structures immergées, etc.

En raison de la forte intensité de la chaleur générée lors d'un incendie important, le béton armé utilisé dans les structures des tunnels peut perdre sa fonction de support. La résistance du béton armé dépend pour une grande part de la température. Ce matériau perd rapidement sa résistance à une température de 400 °C. En particulier, un acier à haute adhérence possède de mauvaises caractéristiques vis-à-vis de la température.

L'augmentation de la température dans l'armature est retardée par la couverture de béton. Dans le passé, il était courant d'avoir une couverture de béton assez importante (jusqu'à 5 cm) sur des aciers doux. Aujourd'hui, on préfère utiliser des aciers à haute adhérence avec une plus faible couverture de béton. La conjugaison des deux facteurs, faible couverture de béton et acier à haute adhérence, est un inconvénient en cas d'incendie.

Les armatures précontraintes peuvent être utilisées pour de grandes portées. Les gaines de précontrainte sont installées aussi bas que possible dans la structure, c'est-à-dire proches de la surface qui peut être chauffée par un incendie.

Dans tous les cas, une isolation thermique résistant au feu peut être appliquée pour éviter des dégradations précoces de la structure. Il est alors nécessaire de considérer la résistance au feu de l'ouvrage dans sa totalité (type et profondeur des aciers, protection supplémentaire, etc.).

VII.4.3 Écaillage

Des écarts de température et de dilatation à l'intérieur du béton et avec l'armature éventuelle peuvent provoquer l'écaillage du béton, dès que la température en surface atteint 200 °C. Cela peut être dangereux pour l'armature qui se trouve ainsi plus facilement exposée à des températures élevées. Comme indiqué dans le chapitre I (§ 1.5), l'écaillage n'apparaissant pas avant une température et un délai donnés, il n'y a généralement pas de risques pour les usagers en fuite, mais cela peut s'avérer dangereux pour les pompiers.

Bien qu'il ne puisse être complètement évité en raison des températures élevées lors d'un incendie, le risque d'apparition de l'écaillage et ses effets peuvent être réduits par une protection résistant au feu. Si aucune protection n'est prévue, il y aura inévitablement un risque plus élevé d'effondrement du tunnel en cas d'incendie.

Le risque d'écaillage est accru par les opérations d'extinction. Il peut survenir lorsque l'eau utilisée pour l'extinction refroidit trop rapidement la structure. Pour plus de détails, voir le paragraphe VII.5.4 "Utilisation des équipements d'extinction des incendies".

VII.4.4 Résistance au feu de la structure principale selon le type de tunnel

Tunnels immergés, tunnels non immergés

Il faut distinguer les tunnels immergés (sous l'eau) et les tunnels "terrestres" (les autres).

Dans un tunnel immergé, une rupture localisée peut provoquer l'inondation totale du tunnel, avec des conséquences catastrophiques pour les personnes et l'ouvrage. Ce type de tunnel étant généralement construit en béton armé, il ne sera pas possible de le réparer après une rupture. Et même si cela était possible, cela prendrait beaucoup de temps et serait très onéreux. De plus, la perte économique résultant de l'interruption de circulation sur une grande période est très importante. Par conséquent, une protection complète est préconisée vis-à-vis de la durée totale de l'incendie le pire. Il est recommandé d'installer une isolation ignifugée sur certaines parties de la structure, là où l'armature est en traction, au plafond et en haut des pénétrations. Il faut compter environ 50 euros/m² pour de telles installations.

Dans un tunnel "terrestre", une rupture localisée aura généralement de moindres conséquences sur la sécurité et l'ouvrage. Les dégâts pourront la plupart du temps être plus facilement réparés et dans un délai plus court, de telle sorte qu'une résistance au feu plus limitée peut suffire.

Toutefois, un certain nombre de tunnels "terrestres" peut conduire à des conséquences semblables à celles d'un tunnel immergé si un effondrement local se produit. Par exemple, la rupture d'un tunnel dans un sol meuble ou bouillant avec une nappe phréatique haute peut être désastreuses pour l'évacuation des personnes. De la même façon, des tunnels peu profonds en site urbain, dont l'effondrement peut affecter et mettre significativement en danger des réseaux structures situés au-dessus, méritent aussi des précautions importantes.

Tunnels en tranchée couverte, tunnels creusés

Une rupture localisée dans une tranchée couverte peut n'avoir que des conséquences limitées sur la sécurité, si la portion concernée du tunnel peut être facilement évacuée en cas d'incendie. Il est généralement possible d'effectuer les réparations dans des temps et à des coûts raisonnables. La durée acceptable de réparation est déterminée par la perte économique due à l'interruption temporaire de liaison. Si le tunnel représente un axe important, le délai de réparation doit être le plus court possible, alors que s'il se trouve sur un itinéraire moins important, on pourra admettre une période de réparation plus longue. Cela est déterminant dans le choix de protéger ou non une structure contre l'incendie.

Dans la plupart des tunnels creusés, une rupture localisée de la structure principale n'aura pas de trop graves conséquences sur la sécurité, à condition que les équipements longitudinaux les plus importants soient situés de telle façon qu'ils soient protégés en toute circonstance. Cependant, bien que ce ne soit pas impossible, la réparation ou le remplacement de certaines parties du tunnel s'avèrent souvent difficiles en raison de la profondeur. Cela dépend des conditions du sol. Il peut arriver qu'une réparation à partir de l'extérieur soit indispensable en raison de l'infiltration de la nappe phréatique dans le tunnel. Cette méthode de réparation est extrêmement longue et fort coûteuse. La protection contre l'incendie doit être adaptée à ces enjeux.

Tunnels creusés dans la roche

Ces tunnels présentent un très faible risque de rupture totale, mais le fait que certaines parties de la voûte puissent tomber doit être envisagé. Cela peut être dangereux pour les usagers et les équipements du tunnel, ainsi que pour les services de secours et leurs équipements. Néanmoins, personne ne peut survivre en un lieu où la température est suffisamment élevée pour conduire à une rupture : le principal risque est que d'importantes installations de sécurité, comme les câbles d'alimentation et de communication, soient détruites ; il faut donc que ces installations soient protégées.

Ce qui est indiqué plus haut sur les tunnels immergés ne s'applique pas aux tunnels sous-marins creusés dans la roche, comme les tunnels norvégiens et japonais. De tels ouvrages se comportent comme les tunnels au rocher décrits dans le présent paragraphe.

VII.4.5 Gaines de ventilation

Il faut porter attention à la résistance au feu des systèmes de ventilation. Les ventilateurs sont examinés au chapitre V. Cette section traite des gaines qui sont nécessaires pour les systèmes de ventilation semi-transversale et transversale.

Dans les tunnels creusés, les gaines de ventilation sont la plupart du temps séparées par un faux plafond dans le tunnel. Le haut de la section transversale est alors utilisé pour fournir ou extraire de l'air. Comme ce plafond est exposé à de fortes températures lors d'un incendie, il y a un risque de rupture du plafond et de coupure de l'alimentation et de l'extraction de l'air, lesquelles sont vitales lors d'un incendie. En conséquence, le risque d'un plus grand nombre de blessés peut accroître rapidement.

Il est donc nécessaire d'examiner les conséquences d'une rupture localisée de gaine en cas d'incendie. Lorsque les conséquences peuvent être sérieuses, telles que la perte de contrôle du courant d'air longitudinal ou l'interruption de l'alimentation d'air frais dans une partie du tunnel où cela est indispensable, la gaine doit être protégée durant la période nécessaire aux opérations de secours et de lutte contre l'incendie. Dans d'autres cas, par exemple lorsque le seul risque d'une rupture localisée est de faciliter l'entraînement de la fumée dans une gaine, aucune mesure spéciale n'est nécessaire en termes de sécurité (s'il n'y a aucun risque d'effondrement en chaîne). La durée d'interruption de la circulation nécessaire aux réparations après un incendie important peut cependant justifier une protection.

Quand les gaines de ventilation sont situées sous la chaussée, la situation est plus favorable quant à la résistance à l'incendie, puisque la dalle est moins exposée à l'incendie. Cependant, cette conception présente aussi des inconvénients comme le poids des véhicules et les dangers présentés par les substances inflammables et/ou explosives s'infiltrant dans les gaines de ventilation. Si l'incendie se propage aux gaines de ventilation, ou si une explosion a lieu dans une gaine, les effets seront catastrophiques.

Les aspects de sécurité doivent être intégrés dans le processus de dimensionnement le plus en amont possible, de telle manière que les risques soient déjà pris en compte dans les études préliminaires. En tenant compte des aspects de sécurité liés aux incendies dès le choix du type de tunnel et des équipements, beaucoup de temps et d'argent ne seront pas investis *a posteriori* pour améliorer la sécurité.

VII.4.6 Itinéraires d'évacuation

Les itinéraires d'évacuation ne sont utilisés que durant la première phase de l'incendie, pour la fuite des usagers pris au piège. Ces itinéraires doivent rester accessibles pendant au moins 30 mn. Dans les cas où ils sont également empruntés par les équipes de secours et les pompiers, la période peut être plus longue. Cependant, il n'est pas nécessaire que ces itinéraires soient protégés contre des conditions auxquelles les pompiers ne peuvent résister à leur arrivée dans le tunnel.

La protection des itinéraires d'évacuation implique que la fumée et les autres produits toxiques générés par l'incendie ou l'accident ne doivent pas polluer l'air de ces issues. De plus, la température à l'intérieur de ces issues ne doit pas être trop élevée. Leur structure ne doit en aucun cas être affectée par la situation (accident important, incendie, fortes températures) qui prévaut à l'intérieur du tunnel lui-même.

VII.4.7 Structures suspendues et autres systèmes attachés au plafond ou aux parois

Utilisation de chevilles et d'ancrages

Tous les dispositifs utilisés pour fixer les équipements aux structures doivent être envisagés par rapport à une situation d'incendie. Cela signifie que l'utilisation des chevilles traditionnelles en plastique et équipements similaires doit être interdite. Ce matériau, en se ramollissant ou en fondant, provoquera la chute de l'équipement. Cela peut même se produire à des endroits qui ne sont pas directement exposés aux flammes. Des recherches complémentaires doivent être menées pour voir dans quelle mesure un plastique spécial peut être utilisé pour la fixation d'équipements à l'intérieur d'un tunnel.

Le comportement des chevilles en acier et des ancrages doit aussi être contrôlé en situation d'incendie. La résistance à la traction diminue à haute température. Le calcul des ancrages doit être fondé sur les températures maximales auxquelles l'ancrage doit continuer à se comporter correctement.

Une distinction doit être établie entre les équipements majeurs, qui doivent continuer à fonctionner en cas d'urgence, et les équipements dont le fonctionnement n'est pas indispensable pendant ou après une catastrophe importante.

Dans tous les cas, comme indiqué au chapitre I (§ 1.5), l'exigence minimale est que les gros équipements ne doivent pas tomber lors de l'évacuation des usagers ou lorsque le personnel de secours est encore dans le tunnel. Cela signifie qu'aucun équipement lourd ne doit tomber en dessous de températures de 400 - 450 °C durant le temps requis pour la lutte contre l'incendie (dans un tunnel, de telles températures produisent un niveau de rayonnement de 5 kW/m², ce qui est le maximum tolérable pour les pompiers).

Usage de l'aluminium

Comme l'aluminium perd sa résistance à une température d'environ 550 °C, il est recommandé d'envisager son utilisation avec prudence. Les matériaux de remplacement sont l'acier ou l'acier inoxydable.