

PRISE EN COMPTE DU RISQUE INCENDIE EN TUNNEL : LA DÉMARCHE DE DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES ET LES DIFFÉRENTES OPTIONS

Laetitia D'ALOIA SCHWARTZENTRUBER, Bérénice MOREAU, Catherine LARIVE

Centre d'étude des Tunnels (CETU), Ministère de l'Écologie du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE)
25 avenue François Mitterrand, 69674 Bron Cedex, France

1. INTRODUCTION

1.1. Le risque incendie en tunnel

La spécificité du risque incendie en tunnel est liée à la nature même de ces ouvrages. L'espace circulé confiné accentue les effets liés à la température et aux fumées lors d'un incendie, tandis que l'auto-évacuation pourrait être rendue difficile par la perte rapide de visibilité. Selon la nature et l'importance du trafic (pourcentage de poids lourds, autorisation ou non de transport de matières dangereuses, situation de congestion, etc.), les mesures en matière de sécurité doivent être adaptées afin de limiter le risque incendie et ses conséquences potentielles sur la sécurité des usagers et des secours.

1.2. La réglementation et la mise en sécurité des ouvrages existants

Les incendies dramatiques qui se sont produits au cours de ces 15 dernières années ont mis en exergue la nécessité de faire évoluer la réglementation relative aux tunnels routiers et ferroviaires. Dans le cas des tunnels routiers, l'Instruction Technique annexée à la Circulaire Interministérielle 2000-63 annulée et remplacée par la 2006-20 relative à la sécurité des tunnels routiers d'une longueur supérieure à 300 mètres [1], fixe les dispositions de sécurité à mettre en œuvre lors de la conception des ouvrages (galerie de sécurité, abris, issues de secours, regards siphoniques, ventilation de désenfumage, sécurisation des réseaux, etc.) et durant leur exploitation

(DAI¹, barrières de fermeture, etc.). Les objectifs de sécurité en matière d'incendie portent sur la sécurité des usagers en phase d'auto-évacuation et d'évacuation aidée, sur la sécurité des services de secours, sur la sécurité des espaces portés par les structures lorsque ces derniers ne peuvent pas être évacués rapidement. Dans certains cas allant au-delà de la réglementation, la préservation de l'ouvrage peut être également considérée afin de limiter le coût de la remise en état et la durée de fermeture de l'ouvrage après incendie.

La mise en sécurité des ouvrages existants, et notamment celle actuellement menée en région parisienne (22 tranchées couvertes concernées), présente de forts enjeux sociaux et économiques dans un contexte de mobilité tendu. Elle amène à faire un point sur les méthodes de calcul au feu des structures de tunnels, sur les solutions en matière de protection des structures contre l'incendie et de limitation du risque d'écaillage des bétons.

Seuls les aspects liés à la tenue au feu des structures de tunnels routiers sont considérés dans cet article. Ainsi l'Instruction Technique définit pour les tunnels routiers de plus de 300 mètres, le niveau de résistance au feu en fonction du type d'élément (structure principale ou secondaire), de sa fonction et de sa localisation (paroi séparant un abri, cloison inter-tube, etc). Elle précise également, pour chaque niveau de résistance, le type d'incendie CN et/ou HCM ainsi que la durée d'incendie (de 60 à 240 min) à prendre en compte.

2. LES SPÉCIFICITÉS DES CALCULS « À CHAUD »

Le principe du dimensionnement à chaud est similaire à celui du dimensionnement à froid : les efforts résistants de la structure doivent être supérieurs ou égaux aux efforts sollicitants. Les cas de charges sont déterminés sous combinaison à l'ELU Accidentelle suivant les prescriptions de l'Eurocode 2, NF EN 1992-1-2 [2]. Les coefficients de sécurité appliqués aux charges mais aussi aux matériaux sont donc tous égaux à 1. Par rapport à un calcul « à froid », ceci a pour effet de diminuer les efforts appliqués à la structure et d'augmenter les efforts résistants lorsque ces derniers sont calculés à température ambiante (20°C). Cependant, la sollicitation thermique appliquée à la structure provoque divers phénomènes : échauffement et dilatation des matériaux, écaillage, apparition de contraintes internes, ayant pour effet à la fois de diminuer la résistance de la structure et d'augmenter les efforts sollicitants pouvant alors conduire à la ruine.

2.1. Les sollicitations thermiques

De manière générale, pour identifier la situation de calcul accidentel, il convient de déterminer le scénario de feu per-

tinant au regard de la structure analysée. Ce scénario est ensuite traduit par une courbe température-temps qui peut être nominale ou paramétrée. Les courbes nominales sont les courbes conventionnelles adoptées pour la classification ou la vérification de la résistance au feu, par exemple la courbe normalisée (CN dite aussi ISO 834) utilisée principalement pour les bâtiments, la courbe hydrocarbure (HC) définie pour l'industrie pétrochimique et la courbe hydrocarbure majorée (HCM) spécifique aux tunnels routiers (Fig. 1). Ces courbes nominales sont des courbes enveloppes qui ne représentent pas de feu réel. On note par exemple l'absence de phase de refroidissement.

Les courbes paramétrées sont elles déterminées à partir de modèles de feu simplifiés proposés par la norme NF EN 1991-1-2 ou de modèles de feu avancés faisant appel à l'ingénierie incendie. Il convient alors de déterminer les paramètres physiques spécifiques définissant les conditions à l'intérieur du compartiment dans lequel se produit l'incendie. Les champs de température sont ensuite déterminés à partir du scénario de feu considéré, à l'aide d'outils de dynamiques des fluides.

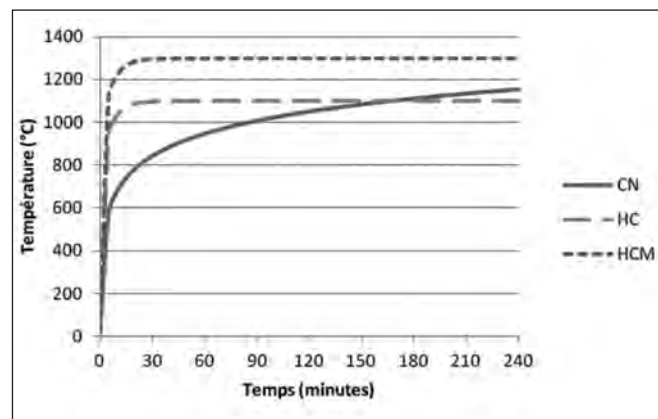


Figure 1 : Courbes température-temps

Deux courbes températures-temps sont utilisées en tunnel pour dimensionner les structures principales au feu : la courbe CN et la courbe HCM. L'Instruction Technique n'autorise pas l'application de l'ingénierie incendie aux tunnels neufs [1]. En effet, on estime que les outils de dynamique des fluides ne sont pas suffisamment robustes pour modéliser un incendie dans un tunnel soumis à un fort courant d'air.

Dans le cas des tunnels existants, qui ne sont pas directement soumis à l'Instruction Technique et dont la protection au feu présente de forts enjeux, on peut néanmoins essayer d'affiner la sollicitation thermique. Cependant, même avec une approche de type ingénierie de la sécurité incendie, une amélioration par rapport aux sollicitations conventionnelles ne peut être obtenue que pour des géométries très particulières. Ce travail peut ne s'avérer utile et accepté que dans quelques cas bien spécifiques.

¹. Détection Automatique d'Incident.

2.2. L'évolution des propriétés des matériaux avec la température

Le calcul à chaud se décompose en un calcul thermique afin de déterminer la température en tout point des sections et un calcul mécanique (cf. paragraphe 3). Le calcul thermique fait appel à des paramètres thermiques des matériaux (tels que la conductivité, la chaleur spécifique etc.) qui n'interviennent pas dans un dimensionnement à froid. Pour le calcul mécanique, on utilise les propriétés mécaniques « classiques » (résistance en compression caractéristique, déformation associée etc.) permettant de tracer la courbe contrainte-déformation des matériaux.

Toutes ces propriétés thermo-mécaniques varient en fonction de la température. L'Eurocode 2 partie 1-2 fournit les évolutions à prendre en compte. La figure 2 donne par exemple le diagramme contrainte-déformation d'un béton à plusieurs températures.

2.3. Les effets indirects du feu

En plus de l'échauffement entraînant une baisse de la résistance et de la rigidité des matériaux comme le montre la figure 2, le feu a des actions indirectes sur la structure dues aux dilatations thermiques. Dans le cas où la structure subit une augmentation de température uniforme, la dilatation causée est elle aussi uniforme (cas des poutres en aciers). Le béton étant un très bon isolant thermique, l'exposition thermique d'un élément en béton produit un gradient thermique et donc des dilatations non uniformes au sein d'une même section faisant apparaître des contraintes internes. A ces contraintes internes s'ajoutent les effets hyperstatiques qui dépendent des conditions aux limites de la structure.

Dans les structures isostatiques, le seul effet de l'incendie est d'affaiblir les sections. Le moment sollicitant est en effet inchangé car les déformations thermiques se produi-

sent librement. Par contre, le moment résistant diminue en raison de l'affaiblissement des propriétés mécaniques de l'acier et du béton avec la température (Fig. 3). Le dimensionnement consiste dans ce cas à assurer un enrobage suffisant de l'acier, ou à en augmenter les sections pour que l'affaiblissement reste acceptable.

Dans les structures hyperstatiques, l'allongement de la fibre chauffée et la courbure qui en résulte sont fortement contrariés. Cela se traduit par un important moment sollicitant ayant pour effet de tendre la face non exposée (Fig. 3). Dans ces sections, le moment résistant est faiblement modifié car les aciers tendus ne sont pas chauffés. Cependant, s'ils sont dimensionnés uniquement à froid, ils ne pourront pas reprendre l'importante augmentation du moment sollicitant à chaud. Le dimensionnement consiste donc à évaluer l'effet des dilatations thermiques empêchées défavorables à la structure et à dimensionner les aciers en conséquence.

2.4. La prise en compte de l'écaillage du béton dans les calculs

L'écaillage est susceptible d'affecter les bétons soumis à une élévation thermique forte et rapide. Sa manifestation et son amplitude dépendent d'un certains nombres de paramètres (Cf. paragraphe 5.2). L'Instruction Technique impose de prendre en compte ce phénomène pour les bétons ordinaires sous courbe HCM et pour les BHP sous courbe CN et HCM. Ce phénomène se traduit par une diminution de la section de béton et de l'enrobage des aciers (côté face exposée), voire à une mise à nue de ces derniers et dans tous les cas à leur échauffement plus rapide. L'écaillage est un phénomène évolutif qui peut apparaître dès les premières minutes de l'incendie. Il est déterminé sur la base de résultats expérimentaux.

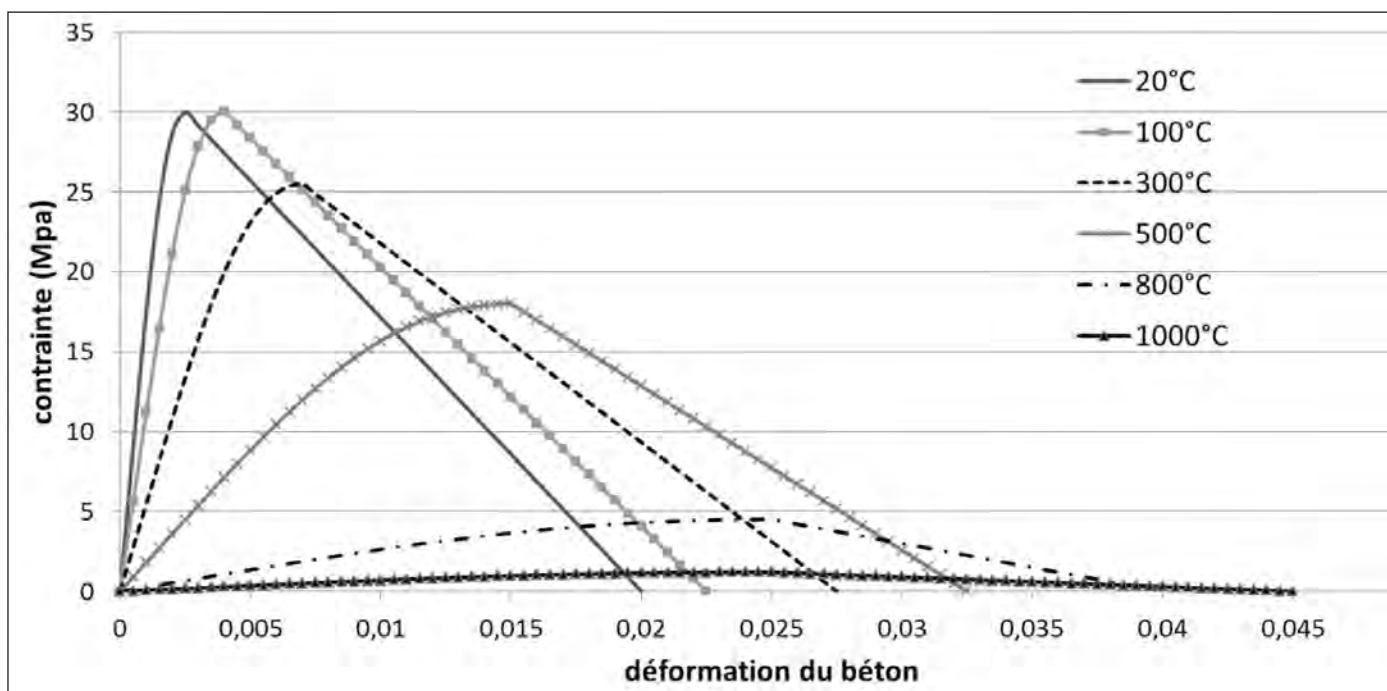


Figure 2 : Diagramme contrainte-déformation du béton ($f_{ck} = 30\text{MPa}$) à hautes température d'après [2].

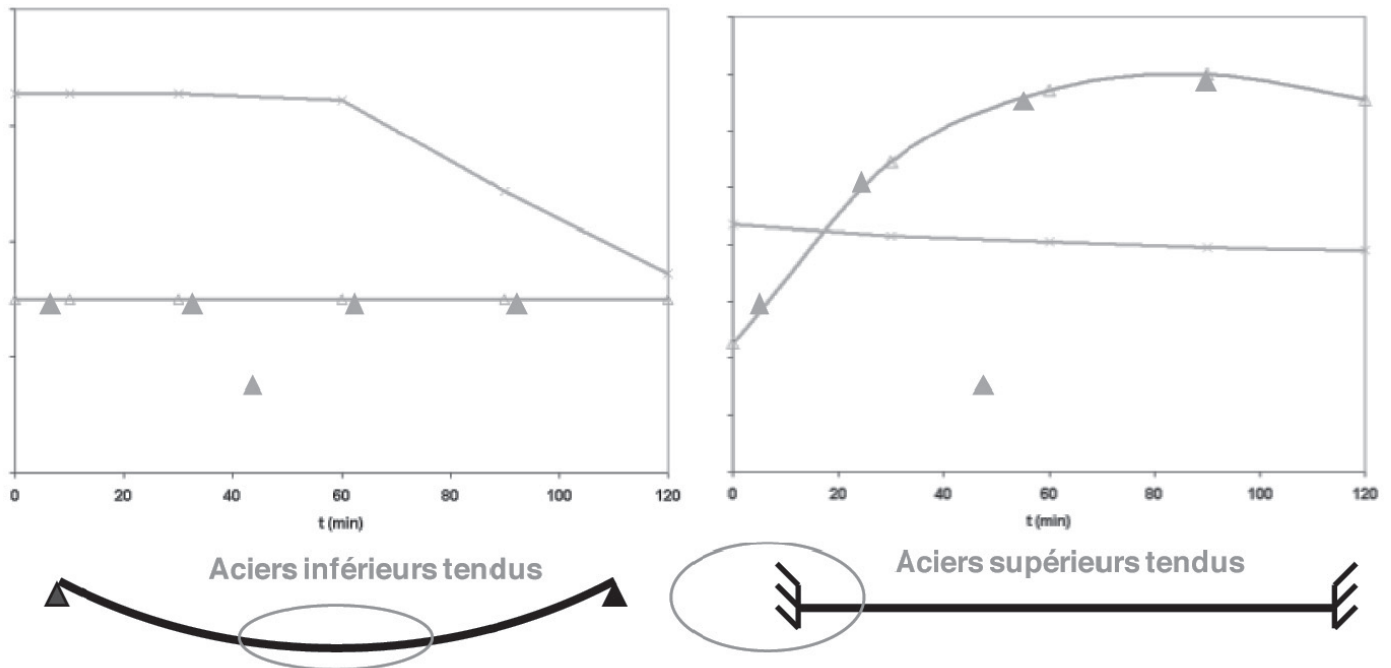


Figure 3 : Evolution des moments dans une structure isostatique (à gauche) et hyperstatique (à droite).

Dans la pratique, la prise en compte de l'écaillage dans le dimensionnement des structures se traduit par la suppression d'une épaisseur de béton dès le début de l'incendie. Cette épaisseur correspond à la valeur d'écaillage mesurée en fin d'essai. Bien que sécuritaire, cette démarche est la seule actuellement acceptable en l'absence de modèle de prévision de l'écaillage, satisfaisant et validé. L'écaillage se produisant généralement en début d'incendie, pendant la phase d'élévation rapide de la température, l'approche reste globalement assez réaliste.

3. MÉTHODOLOGIE DE CALCUL ET OUTILS DISPONIBLES

3.1. Étape 0 : définition des scénarios de feu en tunnel

La sollicitation thermique appliquée dépend du niveau de résistance au feu exigé. L'Instruction Technique fournit pour chaque niveau de résistance le type d'incendie (CN et/ou HCM) et la durée d'incendie (de 60 à 240 min) à prendre en compte.

Deux scénarios d'incendie doivent être envisagés : un incendie généralisé et un incendie localisé. Ces deux scénarios représentent les deux cas les plus défavorables d'incendie en tunnel. L'incendie généralisé est le cas le plus défavorable en pratique pour les sections situées au niveau des encastres. Dans le cas d'un incendie localisé, les contraintes hyperstatiques créées par l'échauffement sont négligées. Le seul effet de l'incendie est alors l'affaiblissement de la résistance de la structure, ce qui est le cas le plus défavorable en pratique pour les sections situées à mi-tra-

vée. L'incendie réel se situe à mi-chemin entre ces deux incendies extrêmes aux conséquences opposées. Une fois la sollicitation thermique définie, le dimensionnement se décompose en trois étapes décrites ci-après.

3.2. Étape 1 : Calcul thermique

La première étape consiste en un calcul thermique prenant en compte les trois types d'échanges thermiques (conduction, convection et rayonnement). Ce calcul permet d'évaluer le champ de température au sein de la structure. La résolution du problème thermique peut se faire à l'aide d'un logiciel aux éléments finis. Dans le cas des tunnels creusés et tranchées couvertes, cette étude se ramène à un calcul à une dimension. Le calcul se fait alors par différences finies en résolvant l'équation de Fourier à l'aide d'un logiciel de programmation ou d'un tableur. Il existe également des abaques fournis par l'Eurocode 2 partie 1-2 pour les sections rectangulaires et circulaires sous feu CN [2].

3.3. Étape 2 : Calcul mécanique

La deuxième étape est le calcul des efforts dans la structure avec prise en compte des efforts induits par les sollicitations thermiques. La résolution de ce problème mécanique peut se faire de façon simplifiée ou de manière plus réaliste avec des modèles avancés.

L'Eurocode 2 partie 1-2 classe les méthodes de calculs en 3 catégories : les valeurs tabulées, les calculs simplifiés et les calculs avancés. Alors que l'Eurocode 2 présente en détails les valeurs tabulées et plusieurs méthodes simplifiées, aucune méthode avancée n'est décrite. Les méthodes proposées permettent de calculer la résistance au feu d'un

élément structurel « à la main ». Elles sont adéquates pour des éléments de structure considérés comme isolés et pour des structures pour lesquelles le seul effet de l'incendie est d'affaiblir les sections. Dans le cas des tunnels, ces méthodes ne peuvent donc être appliquées que pour déterminer les efforts résistants d'une structure, et dans le cas d'un incendie localisé, pour le dimensionnement d'éléments secondaires comme des dalles de ventilation.

Afin de prendre correctement en compte les effets hyperstatiques dus aux dilatations thermiques empêchées de la structure qui génèrent des efforts supplémentaires, le guide du comportement au feu des tunnels routiers du CETU introduit trois degrés d'analyse de complexité croissante : G1, G2 et G3 [3]. Au stade du dimensionnement, on peut choisir le degré d'analyse G1, qui correspond à une analyse linéaire de la structure, ou G2, qui permet de prendre en compte la plastification des sections les plus sollicitées par l'intermédiaire de rotules plastiques. Avec le degré d'analyse G1, toutes les sections sont dimensionnées afin que le moment résistant ne soit jamais dépassé. Le degré d'analyse G2 permet un dimensionnement optimisé. On peut y recourir si les sections d'acier obtenues avec le degré d'analyse G1 ne sont pas réalistes.

Le degré d'analyse le plus avancé G3, consiste à prendre en compte l'ensemble des effets non linéaires : non linéarité du profil de température, non linéarité de la loi de comportement des matériaux, non linéarité géométrique et non linéarités liées au changement des conditions d'appuis.

3.4. Étape 3 : Vérification de la stabilité

Pour finir, la dernière étape du dimensionnement est la vérification des sections en prenant en compte la variation des caractéristiques mécaniques des matériaux avec la température conformément à l'Eurocode 2 partie 1-2. Pour une analyse de degré G2 et G3, la plastification des sections est autorisée. Ainsi, il est également nécessaire de vérifier le nombre et la capacité de rotation des rotules plastiques, et les déformations limites.

Contrairement au calcul à froid, les rigidités et les efforts de la structure varient avec la température et donc dans le temps. Il se peut que l'instant où la structure est la plus sollicitée ne corresponde pas à la durée maximale de l'incendie. Il est donc en général nécessaire de vérifier la structure à plusieurs instants au cours de l'incendie, d'où une démarche menée « pas à pas » en calculant la stabilité de la structure sous incendie toutes les 15 ou 30 minutes par exemple.

3.5. Les logiciels numériques

Pour une analyse G1 ou G2, la structure est modélisée par un logiciel de calcul linéaire de structures à barres. Les caractéristiques des barres doivent être adaptées aux rigidités chauffées des sections. Les déformations thermiques sont ensuite imposées à la structure pour obtenir les diagrammes des efforts. Pour les logiciels qui ne permettent pas de travailler en déformations imposées, il est possible

d'introduire dans le modèle un gradient thermique équivalent fictif et une température équivalente fictive. Ces méthodes sont présentées dans le guide du comportement au feu des tunnels routiers [3].

Une méthode de calcul G3 est décrite dans les compléments au guide du comportement au feu des tunnels routiers du CETU [4] en utilisant des outils répandus tels qu'un logiciel de calcul « linéaire » ayant un langage de pseudo-programmation. Une programmation de cette méthode dans le logiciel St1 développé au sein du réseau scientifique et technique du MEDDE est en cours [5]. Ce travail est réalisé par le CETU, la DIOA² et le SETRA³.

Les différents degrés d'analyse peuvent être mis en œuvre par les bureaux d'études à travers l'utilisation de logiciels largement diffusés et habituellement utilisés pour les calculs à froid. Des calculs préliminaires, voire une programmation, sont néanmoins nécessaires. Le recours à d'autres méthodes plus répandues est également possible en utilisant des logiciels de calcul aux éléments finis. Deux catégories de logiciels peuvent être distinguées : les logiciels généralistes et les logiciels spécialisés. Les programmes généralistes sont les logiciels qui ne sont pas dédiés au calcul au feu des structures et qui peuvent être utilisés dans d'autres domaines que celui du génie civil. Ces logiciels ont l'avantage d'être très documentés. Ils sont également largement utilisés et validés. Ils demandent néanmoins une certaine expérience et un savoir-faire pour pouvoir être utilisés dans le domaine du dimensionnement à chaud. A l'opposé, des logiciels spécialisés sont développés avec l'objectif de modéliser les structures sous incendie. Majoritairement développés et utilisés au sein de centres de recherche, ils deviennent aujourd'hui de plus en plus accessibles aux bureaux d'études spécialisés dans l'ingénierie de la sécurité incendie. Ils peuvent également servir d'outils de référence pour la validation des autres logiciels sur la base de cas types.

4. LA TENUE AU FEU DES STRUCTURES DE TUNNELS

Dans le cas des ouvrages neufs comme dans celui des ouvrages existants, l'une des questions essentielles réside dans la prise en compte du risque d'écaillage du béton. Comme déjà mentionné dans le paragraphe 2.4, l'Instruction Technique impose de prendre en compte ce phénomène pour les bétons ordinaires sous courbe HCM et pour les BHP sous courbe CN et HCM. Si l'écaillage doit être pris en compte, il doit être déterminé expérimentalement et introduit dès le début des calculs à chaud.

La méthode de calcul à chaud des structures de tunnel décrite au paragraphe 3 peut être mise en œuvre pour le dimensionnement des structures neuves ou pour la vérification des structures existantes. Bien que la marge de manœuvre soit plus grande pour les structures neuves (possibilité d'augmenter l'enrobage, de renforcer les aciers, et

2. Département d'Ingénierie d'Ouvrages d'Art de la Direction Régionale et Interdépartementale de l'Équipement et de l'Aménagement d'Ile de France (DRIEA-IF).

3. Service d'Études sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements.

dans une moindre mesure d'augmenter les sections de béton), les calculs peuvent parfois conduire à la nécessité de protéger la structure des effets de l'incendie (limitation des gradients thermiques et prévention du risque d'écaillage). Dans le cas des structures neuves, il est également possible de mettre au point un béton d'écaillage nul, ou tout du moins limité.

Une analyse technico-économique peut parfois se révéler pertinente afin de faire un choix entre les différentes options. Cette analyse doit également intégrer les contraintes de réalisation, d'exploitation (y compris pendant les travaux), de maintenance et d'inspection, ainsi que les contraintes liées au gabarit.

4.1. Le cas des ouvrages existants

Dans le cas des ouvrages existants, il s'agit d'une démarche de vérification des structures. Une fois les niveaux de résistance au feu définis conformément aux objectifs de l'Instruction Technique, il s'agit de collecter les informations disponibles sur l'ouvrage : nature des bétons, classes de résistance, plans de ferrailage, enrobage des aciers, chargements, etc. Des calculs doivent alors être menés sur la base de ces données et des exigences qui définissent la nature et la durée des sollicitations thermiques à considérer. Ces calculs de vérification sont conduits conformément à la méthodologie décrite dans le paragraphe 3, sachant que, pour les ouvrages existants, la rotation maximale admissible pour les rotules plastiques est de 25mrd [4].

S'il est nécessaire de prendre en compte un éventuel risque d'écaillage des bétons, ce dernier doit être évalué et quantifié expérimentalement. Plusieurs cas de figure peuvent se présenter :

- Une évaluation est possible sur des éléments de béton prélevés dans l'ouvrage et de dimensions suffisantes pour concevoir un essai représentatif de la structure (chargement compris). Ces essais doivent être réalisés par un laboratoire agréé.
- Une évaluation in-situ est possible à travers l'utilisation de fours « mobiles »⁴ qui permettent de tester directement la structure sur une ou quelques zones localisées jugées représentatives pour évaluer l'écaillage.

Comme déjà mentionné au paragraphe 2.4, la prise en compte de l'écaillage se traduit de manière sécuritaire dans les calculs par la suppression d'une épaisseur de béton dès le début de l'incendie. Cette épaisseur correspond à la valeur d'écaillage mesurée en fin d'essai.

Avec ou sans écaillage, les calculs peuvent conduire à l'absence de tenue au feu de la structure. Dans ce cas, il est nécessaire de mettre en place des protections passives rapportées. Elles permettent de limiter l'échauffement du béton et des aciers, de limiter les gradients thermiques et également de s'affranchir du risque d'écaillage. Un second calcul de vérification avec la protection est néanmoins nécessaire. Ce calcul est conduit en appliquant à la surface protégée du béton, la température mesurée lors de l'essai de validation de la protection, ou bien la température maxi-

male atteinte lors de ce même essai. En effet, des températures acceptables vis-à-vis de la résistance des matériaux peuvent néanmoins produire des dilatations thermiques et des efforts que ne peut reprendre la structure dans certains cas. L'épaisseur de la protection doit donc être déterminée en ce sens.

Dans certains cas, il arrive que l'écaillage ne puisse être évalué (prélèvement d'éléments de béton impossible), ou bien que les données sur le béton, l'enrobage des aciers ne soient pas disponibles ou que des investigations ne puissent être conduites ou ne donnent pas de résultats satisfaisants. Dans ces cas, il est nécessaire de protéger la structure par défaut. Lorsque les données nécessaires sont manquantes, rendant impossible la réalisation du calcul de la structure, la température de la face protégée est en général limitée de manière drastique de manière à limiter toutes pertes de propriétés des matériaux et tout gradient thermique.

4.2. Le cas des ouvrages neufs

Dans le cas des ouvrages neufs, il s'agit d'une démarche complète de dimensionnement des structures. Les niveaux de résistance au feu sont définis en accord avec l'Instruction Technique. Dans un premier temps, la structure est dimensionnée à froid. Puis, la question de la nécessité de prendre en compte ou non l'écaillage des bétons est traitée de la même façon que pour les ouvrages existants. S'il est nécessaire de prendre en compte le risque d'écaillage (BHP ou courbe HCM), on peut choisir de mettre au point un béton n'écaillant pas (ou peu) afin de limiter le dimensionnement de la structure. Cette solution présente également des avantages en termes de durabilité et d'entretien. On se ramène alors au cas où il n'est pas nécessaire de prendre en compte le risque d'écaillage.

Une fois la question de l'écaillage traitée, on procède à un dimensionnement à chaud selon la méthodologie présentée au paragraphe 3, sur la base du dimensionnement à froid. A noter que dans le cas des structures neuves, la rotation maximale admissible pour les rotules plastiques est fixée en accord avec la figure 5.6N de l'Eurocode 2 partie 1-1. Si le dimensionnement à froid ne permet pas de reprendre les efforts à chaud, il est possible de modifier les aciers, leur enrobage, voire l'épaisseur des sections de manière à ce que la stabilité des structures soit vérifiée.

Le surdimensionnement des structures pour assurer leur stabilité à chaud peut impacter de manière significative le coût de l'ouvrage. Il est également possible que le dimensionnement obtenu pose des problèmes de conception ou de réalisation (densité des aciers trop importante, épaisseur des sections trop grande, etc.). Il peut alors se révéler plus opportun de mettre en place des protections passives sur la base du dimensionnement à froid. Comme pour le cas des ouvrages existants, un second calcul avec la protection est alors généralement nécessaire.

On peut aussi choisir de protéger la structure par défaut pour ne pas avoir à supporter le délai et le surcoût éventuel générés par la mise au point d'un béton n'écaillant pas ou

4. De tels dispositifs d'essais ont été développés par des laboratoires agréés et sont actuellement en cours de validation.

pour limiter l'impact d'un incendie sur le temps nécessaire pour rouvrir l'ouvrage à la circulation. C'est pourquoi, une analyse technique et économique peut se révéler très utile pour choisir entre protéger par défaut et mettre au point un béton ne présentant pas d'écaillage.

5. LA PRÉVENTION DU RISQUE D'ÉCAILLAGE DES BÉTONS

Dans les incendies courants, en raison de leur faible porosité, ce sont les BHP qui sont le plus sensibles au risque d'écaillage. Dans le cas des tunnels, les sollicitations thermiques en milieu confiné sont particulièrement sévères, ce qui entraîne un fort risque d'écaillage des BHP mais également des bétons ordinaires.

Il n'existe à l'heure actuelle aucune loi théorique permettant de déterminer l'écaillage et son évolution au cours du temps. Des modèles thermo-hydro-mécaniques sont développés pour modéliser l'écaillage du béton mais ces derniers sont très complexes et nécessitent encore des développements et des études de validation. Ils ne permettent pas aujourd'hui de prédire correctement l'écaillage. L'évaluation de l'écaillage ne peut donc se faire que par le recours à l'expérimentation.

5.1. Les protections passives rapportées

Les différents systèmes de protection passive sont constitués soit de plaques rapportées ou placées en fond de coffrage, soit de mortiers projetés ou coulés en place (Fig. 4). Les plaques à base de liants hydrauliques et autres constituants sont mises en place suivant un plan de calepinage précis. Elles sont fixées soit directement dans le support à protéger (cas le plus général) soit sur des ossatures en acier.



Mise en place de plaques



Mise en place de matériaux projetés

Figure 4 : Les différents types de protections passives.

Des mortiers à base de constituants de même type peuvent être également projetés ou coulés en place selon la partie de l'ouvrage à protéger. Dans tous les cas, l'épaisseur mise en place doit être adaptée afin de répondre aux objectifs du cahier des charges, généralement formulés en termes de température maximale admissible du béton derrière la protection ou de température critique des aciers à ne pas dépasser. Indépendamment de la nature du produit utilisé, c'est l'ensemble du système de protection qui importe : épaisseur de la protection, nature du support, mode de fixation et de mise en œuvre, etc. C'est ainsi que les systèmes de protection passive doivent justifier de leur résistance au feu par un rapport de classement associé au marquage CE (dans le cas d'une sollicitation CN) ou par un procès-verbal d'essai rédigé par un laboratoire agréé sur la base d'un ou plusieurs rapports d'essai. Pour un chantier donné, lorsque des écarts existent entre les conditions d'essais du système de protection et celle de la mise en œuvre prévue, il peut être nécessaire de demander un avis de laboratoire à l'un des laboratoires agréés. Cet avis n'est valable que pour le chantier en question [6].

5.2. La formulation de bétons résistant au feu

Les phénomènes à l'origine de l'écaillage peuvent être de deux ordres : une dilatation empêchée en face exposée du fait de forts gradients thermiques et/ou une augmentation de la pression dans les pores due à la vaporisation de l'eau, à sa migration vers la face non chauffée et à la formation d'un bouchon hydrique lors du refroidissement [7,8] (Fig. 5). L'écaillage dépend à la fois des caractéristiques du béton (formulation, teneur en eau, granulats, ajouts, additions, adjuvant, etc.) et de l'élément structurel (géométrie, chargement, etc.). Les interactions entre les différents paramètres

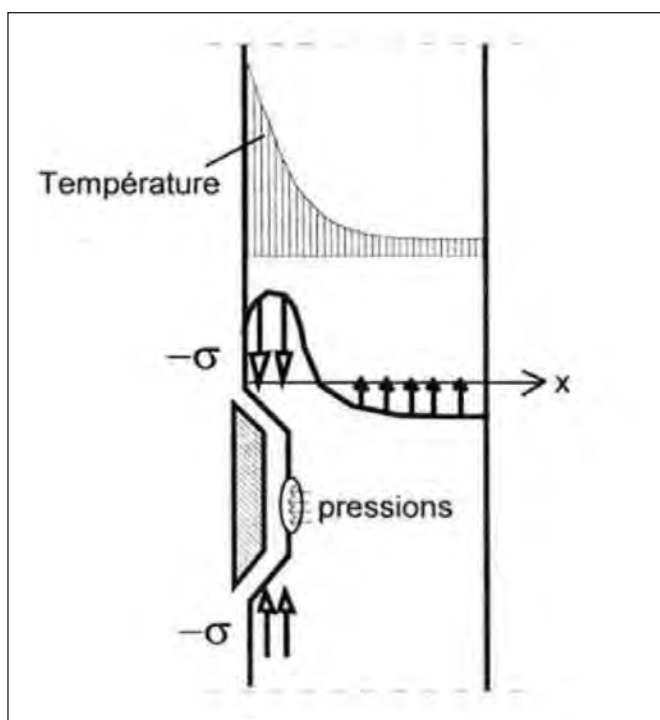


Figure 5 : Effet combiné de la pression dans les pores et des contraintes thermiques dans le mécanisme d'écaillage [8]

de formulation sont encore mal connues. Néanmoins, la piste qui consiste à ajouter des micro-fibres de polypropylène (PP) dans le béton pour limiter voire supprimer le risque d'écaillage, apparaît aujourd'hui comme la plus efficace. C'est ainsi que l'Eurocode 2 partie 1.2 et son annexe nationale recommandent d'ajouter 2 kg de de microfibres PP mono-filaments, de diamètre inférieur à $50\mu\text{m}$ et de longueur comprise entre 1 et $4 D_{\text{max}}$ ⁵, dans la formulation d'un BHP pour que ce dernier ne présente pas d'écaillage sous sollicitation CN. Dans le cas d'une sollicitation de type HCM, il est possible de s'inspirer de ces préceptes pour formuler le béton, mais des essais sont nécessaires pour vérifier l'absence effective d'écaillage. Dans la pratique, en tunnel, la longueur maximale des fibres utilisées est généralement de l'ordre de 20mm, soit environ D_{max} .

L'action des fibres PP est expliquée par une mauvaise adhérence entre la pâte de ciment et les fibres, par la fonte de ces dernières vers 165°C et leur pyrolyse entre 350 et 450°C . Les espaces ainsi libérés permettent de limiter les effets dus à l'augmentation de pression de vapeur dans les pores même pour de faibles élévations thermiques. Dans une moindre mesure, l'action des agents entraîneurs d'air sur le comportement à l'écaillage du béton a également été mise en évidence [7,8].

Les compléments au guide du comportement au feu des tunnels routiers présentent la démarche à suivre pour mettre au point un béton n'écaillant pas (ou peu) [4]. Une première étape consiste à rechercher un béton répondant aux spécifications habituelles du cahier des charges (rhéologie, résistance mécanique, durabilité, etc.). Pour intégrer le critère d'écaillage nul, on peut faire varier un certain nombre de paramètres, dans les limites des possibilités d'approvisionnement du chantier. On peut étudier différents dosages en

fibres de polypropylène ou en entraîneur d'air ou encore différents diamètres et longueurs de fibres. Une fois les différentes formules testées simultanément lors d'un essai au feu sur des dalles, la plus performante sera retenue. Des éléments témoins représentatifs de la structure et de son chargement seront alors préparés et de nouveaux essais (dits de convenance) seront réalisés. Ces essais permettront d'évaluer une éventuelle valeur non nulle de l'écaillage dans une configuration représentative de structure. Si les études sont conduites par le MOA en amont des travaux, la formule de béton pourra être imposée au marché (Béton à composition prescrite : BCP). Si l'étude est réalisée par l'entreprise, il faudra s'assurer qu'elle dispose d'un temps suffisant pour la mener à bien (Béton à propriétés spécifiées : BPS).

6. CONCLUSIONS

La prise en compte du risque incendie en tunnel, la spécificité de ce type d'ouvrage et l'importance des enjeux sociaux et économiques ont rendu nécessaire la formalisation des calculs de tenue au feu des structures sous incendie. Si une adaptation du dimensionnement est possible pour les structures neuves, dans le cas des ouvrages existants, il est bien souvent nécessaire de mettre en place des protections passives. Par ailleurs, les sollicitations thermiques particulièrement violentes en tunnel amènent bien souvent à considérer un risque d'écaillage des bétons. Dans le cas des ouvrages neufs, il est possible de mettre au point un béton n'écaillant pas, ou peu, et donc de s'affranchir de ce risque. Une analyse technico-économique peut permettre de choisir entre les différentes options.

7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Instruction technique relative aux dispositions de sécurité dans les nouveaux tunnels routiers (conception et exploitation), annexe à la Circulaire Interministérielle n° 2000-63 du 25 août 2000 remplacée depuis par la circulaire n°2006-20 relative à la sécurité des tunnels routiers d'une longueur supérieure à 300 mètres.
- [2] Eurocode 2 : Calcul des structures en béton, partie 1-2 : règles générales – Calcul du comportement au feu, NF EN 1992-1-2, octobre 2005.
- [3] Guide du comportement au feu des tunnels routiers. CETU, mars 2005.
- [4] Compléments au guide du comportement au feu des tunnels routiers. CETU, mars 2011.
- [5] www.setra.equipement.gouv.fr/html/logicielsOA/ST1/st1.html
- [6] Systèmes de protection passive contre l'incendie – Justification des performances pour les structures de tunnels routiers. CETU, à paraître au 1^{er} trimestre 2013.
- [7] G. A. Khoury and B. Willoughby. Polypropylene fibres in heated concrete. Part 1: Molecular structure and materials behavior. Magazine of Concrete Research, 2008, 60, n°2, p. 125-136.
- [8] G. A. Khoury and B. Willoughby. Polypropylene fibres in heated concrete. Part 2: Pressure relief and modeling criteria. Magazine of Concrete Research, 2008, 60, n°3, p. 189-204.

5. Diamètre maximal des granulats.