



**INNOVATIVE. FIRE. SYSTEMS.**  
**PROTECTION PASSIVE INCENDIE**

## **TUNNEL IMMERGE** **BJORVIKA à OSLO**

**COMMENT EST REALISE LA PROTECTION AU FEU LA PLUS EXIGEANTE AU MONDE**



### **Le projet municipal :**

la Mairie d'Oslo a décidé en 1983 d'améliorer le trafic routier le long de son fjord (la baie de Bjorvika). Elle a profité de cette opportunité pour offrir un nouvel espace au développement urbain, mais aussi pour créer un système de transport plus respectueux de l'environnement en centre-ville. Avec plus de 120 000 véhicule/jour circulant le long de la baie, les autorités routières norvégiennes ont décidé de construire un tunnel immergé pour réduire les bouchons, le bruit et la pollution. Pour bâtir ce tunnel, elles ont décidé de préfabriquer six éléments en béton à faible perméabilité (dans une usine de préfabrication on-shore située à Bergen) de 112,5 mètres de long, 10 mètres de haut et 40 mètres de large, pour un poids maximal de 37 000 tonnes. Ces éléments après avoir été préfabriqués ont été transportés par mer sur 800 kilomètres, ce qui a nécessité environ 5 jours. Une fois arrivés sur site, quatre réservoirs de ballast ont été placés à l'intérieur de chacun d'entre eux puis remplis d'eau pour les immerger. Il aura fallu 14 jours de voyage par élément. Les éléments du tunnel ont été amenés dans leur position finale sur le fond de la tranchée creusée.

**TUNNEL IMMERGE de BJORVIKA – PROTECTION AU FEU avec le FIRE BARRIER 135**



## **INNOVATIVE. FIRE. SYSTEMS.**

Chaque élément a été positionné sous l'eau contre l'élément précédent. L'eau restant dans l'espace entre les cloisons a été pompée. La pression de l'eau sur l'extrémité libre du dernier élément mis en place (estimée à 3500 tonnes) a comprimé le joint de caoutchouc entre les deux éléments, rendant la jonction étanche. Une fois le tunnel entièrement raccordé, les réservoirs d'eau ont été remplacés par du béton, qui constitue désormais le poids permanent du tunnel immergé. Un remblai a été placé à côté et par-dessus le tunnel pour remplir la tranchée et enterrer définitivement le tunnel.



### **Comment s'assurer de la protection au feu maximal:**

#### **Méthodologie de calcul thermique des structures**

Les concepteurs de structures de tunnels s'appuient généralement les règles utilisées dans le bâtiment, à savoir les Eurocodes. En général, on calcule la température à l'intérieur du béton, ce qui permet d'obtenir la capacité porteuse. Ces calculs fonctionnent bien pour de nombreuses applications, mais ont leurs limites. Dans la norme EN 1992-1-2, reprenant les Eurocodes pour les structures en béton, les modèles de matériau ne sont valables que pour des vitesses d'échauffement comprises entre 2 et 50 °C/minute, car les effets du fluage ne sont pas explicitement pris en compte. Les Autorités Norvégiennes estiment que cela donnent des résultats erronés. Elles ont préféré retenir pour modéliser leurs structures de ce tunnel une vitesse d'échauffement plus rapide, correspondant à la courbe temps-température hollandaise RWS, où des vitesses d'échauffement maximale de 200 – 240 °C /minute.



## INNOVATIVE FIRE SYSTEMS. PROTECTION PASSIVE INCENDIE

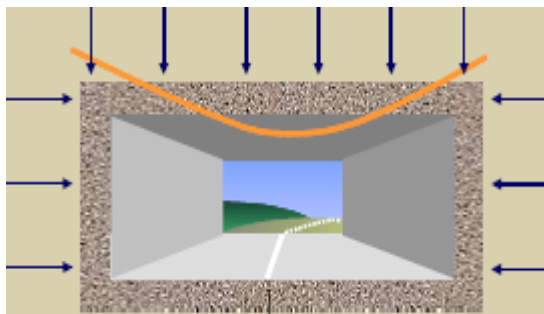
### Efforts induits par les dilatations thermiques dans des structures hyperstatiques

Afin de déterminer le revêtement de protection incendie le plus approprié, les autorités suédoises et norvégiennes ont mené en 2006 une série d'essais au feu sur béton lourd, avec trois produits différents, et en sont arrivées aux conclusions suivantes. La résistance au feu, en termes de tenue en température et d'éclatement, a été déterminée expérimentalement pour plusieurs qualités de béton. Le béton renforcé de fibres de polypropylène a obtenu de très bons résultats. Toutefois, il existe de grandes interrogations quant à sa durabilité à long terme de ces fibres, notamment en termes de résistance au gel et de pénétration d'ions chlorure.

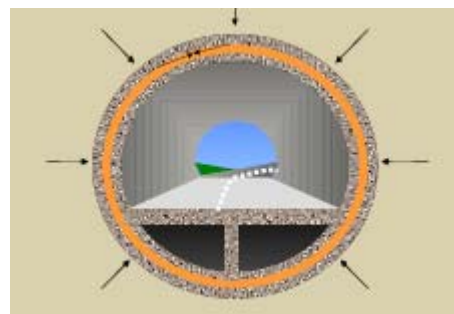
### Test au feu le plus contraignant au monde pour les tunnels

Les essais réalisés sur béton avec certaines protections rapportées n'ont pas été satisfaisants, car bien que les produits utilisés présentaient des résultats précédents documentés, ils se sont révélés incapable de répondre aux sollicitations extrêmes de cette série de tests. Dans la présente étude, trois systèmes différents ont été testés sous dalle chargée avec un effort de compression du béton de 5.5 Mpa, et tous ont échoué. Par conséquent, la Direction des routes norvégienne a publié en juin 2007 (TR-2494) un rapport précisant sa méthode de test des systèmes rapportés de protection incendie dans les tunnels.

Celle-ci sera établie selon la courbe au feu RWS, tout en reproduisant au mieux le moment fléchissant de leur structure hyperstatique et ainsi pouvoir simuler le moment plastique crée par la charge permanente sous l'élévation de température.



*Tunnel immergé ou Tranchée couverte*

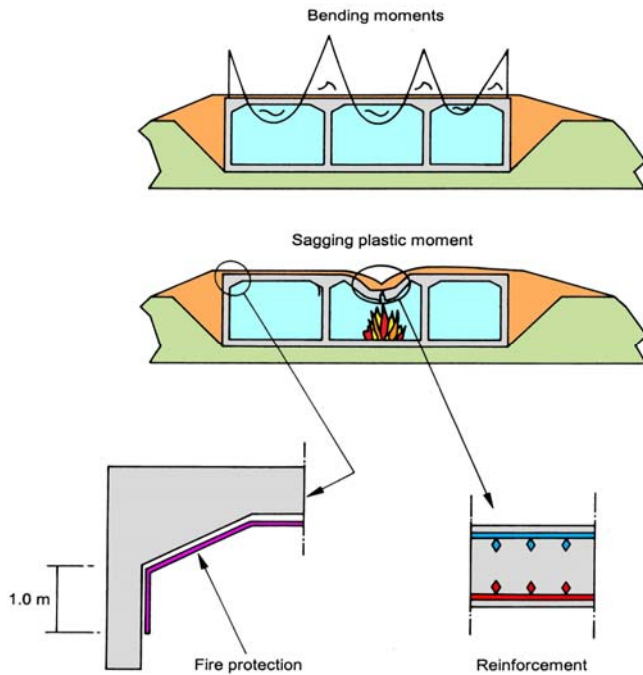


*Tunnel foré*

La direction des routes n'a pas souhaité reproduire la méthodologie de test au feu réalisé en Hollande pour des tunnels forés, qui ne reprend aucune des contraintes qui s'appliquent aux structures hyperstatiques.



## INNOVATIVE FIRE SYSTEMS.



Les essais au feu devront donc être réalisés sur de grands éléments en béton post contraint avec une portée de 3.6 mètres, positionnés dans un four horizontal, une charge sera appliquée sur la dalle de 4644 kN, pour appliquer une résistance théorique à la compression de 12,9 MPa sur la face exposée.

Par contre les autorités Norvégienne ont adopté la même philosophie que celle de la circulaire française 2000-63 recommandations mars 2005 (annexe F3.1) pour réaliser le test sur de grandes dalles chargées (4m x 3m), et d'y appliquer un chargement (annexe F3.3).

Par ces exigences cumulées de grandes portées, chargées, sous un feu de 300 MW, nous pouvons dire que le Fire Barrier 135 à réalisé avec succès le test au feu le plus exigeant au monde en matière de tunnel immergé et/ou de structures hyperstatiques.

Les essais au feu devront être effectués dans un laboratoire certifié ISO 9001 ou ISO/IEC 17025. Seront également exigés un test de résistance au gel selon EN 1387-1 (40 cycles de -20°C à 10°C), un essai de fatigue sur 50 millions de cycles, un test de résistance au nettoyage haute pression de 150 bars, un test de résistance aux alcalis et un essai de carbonatation.

### Les performances du mortier projeté Fire Barrier 135 :

INNOVATIVE FIRE SYSTEMS, distributeur mondial exclusif depuis mai 2003 du mortier FIRE BARRIER 135, a déjà signé plus de 35 contrats pour des tunnels, en France, en Espagne, à Monaco, en Italie et en Égypte. Pour ce projet, Thermal Ceramics a été l'unique fournisseur à prendre le risque de passer cette série de tests, représentant un investissement supérieur à 150 000 EUR. Le fournisseur de plaques rapportées et de mortier projeté à base de vermiculite (tous deux appartenant au même groupe) n'ont ni l'un ni l'autre tenté de nouveaux essais sur leurs produits, après leur échec initial effectué pour le métro de Malmö en Suède en 2006.

Forts de 15 essais au feu antérieurs avec le FIRE BARRIER 135, réalisés dans cinq laboratoires (TNO, CSI, CSTB, SINTEF) en respectant trois courbes au feu différentes (RWS, HCinc, ISO) avec plusieurs types de béton (résistance à la compression comprise entre 35 et 76 MPa).



**INNOVATIVE FIRE SYSTEMS.**  
**PROTECTION PASSIVE INCENDIE**

INNOVATIVE FIRE SYSTEMS et THERMAL CERAMICS ont décidé de répondre aux exigences de la Direction des routes norvégienne. Avec le système FIRE BARRIER 135, nous avons connu une année d'essais intensifs.

Plusieurs tests de résistance au feu, de caractérisation physique et de longévité, ont été réalisés à l'Institut national suédois d'essais et de recherche à Borås. La charge combustible était dimensionnée pour un feu de 300 MW pendant un minimum de deux heures, conformément à la courbe RWS. Les surfaces étaient protégées par une épaisseur de 36 mm de FIRE BARRIER 135 renforcé de grillages en acier inoxydable de 1,9 mm de diamètre, en 50 mm x 50 mm, fixés au béton par des écarteurs et des chevilles placés tous les 40 cm x 40 cm. Après deux heures, la température moyenne à l'interface était inférieure à 265°C.

La résistance aux alcalis a été mesurée en respectant la spécification Norvégienne. La protection incendie doit durcir/être conditionnée pendant un minimum de six (6) semaines à 23±2°C / 50±5 % HR avant le début de l'essai. Un ensemble d'éprouvettes (5 échantillons minimum) est resté pendant deux (2) jours dans du NaOH 1N (hydroxyde de sodium à 1 mole/litre) à 23±2°C, rincé à l'eau distillée et conditionné à 23±2°C / 50±5 % HR pendant un minimum de quatre (4) semaines. Parallèlement, un autre ensemble d'éprouvettes (5 échantillons minimum) a été conditionné à 23±2°C / 50±5 % HR pendant un minimum de quatre (4) semaines sans subir au préalable d'attaque alcaline.

Ensuite, un test d'adhérence a été effectué sur les deux ensembles selon EN 1542:1999. L'adhérence de la protection incendie au béton de référence n'a pas été réduite de plus de 20 % par l'effet des alcalis, et le revêtement ne présentait aucun signe de dégradation à la suite de l'attaque alcaline.

Le test de résistance à la carbonatation a été réalisé selon la norme EN 13295:2004, Résistance à la carbonatation due à une réaction au CO<sub>2</sub> produit par la zone de trafic.

Le test de résistance au gel a quant à lui été effectué selon EN 13687-1:2002. L'essai se termine après 50 cycles de 4 heures. Il se compose d'une immersion de 2 heures dans un réservoir contenant une solution saturée de chlorure de sodium à une température de -15±2°C, puis d'un stockage de 2 heures dans un réservoir d'eau à une température de 21±2°C.

L'essai de fatigue a été effectué en respectant la spécification Norvégienne : la protection incendie, y compris les ancrages mécaniques, respecte les exigences de résistance aux charges imposées par le trafic dans le tunnel. Le trafic dimensionné est de 100 000 véhicules par jour. Les forces dynamiques suivantes de pression/aspiration ont été appliquées durant 15 millions de cycles : arrachement 1,97 kPa, compression 1,56 kPa.



## INNOVATIVE FIRE SYSTEMS.

L'essai de nettoyage haute pression a lui aussi été effectué en respectant les spécifications Norvégiennes. La protection incendie et ses surfaces doivent tolérer un lavage périodique normal du tunnel : 120 opérations de nettoyage ont été menées de 50 à 150 bars pendant une minute sur un m<sup>2</sup> avec un débit d'eau variant de 10 à 25 litres/minute/buse, avec une distance de 500 mm entre les buses et la protection incendie, ceci pour simuler l'espérance de vie totale.

### Les travaux d'installation du mortier projeté Fire Barrier 135 :

INNOVATIVE FIRE SYSTEMS possède une expérience éprouvée d'application du mortier fire barrier 135 dans des chantiers où le facteur délai est essentiel. Dans le tunnel de Bjorvika, I.F.S devait réaliser plus de 35 000 m<sup>2</sup> de FIRE BARRIER 135 à installer avant le début de l'automne. I.F.S a mobilisé 60 ingénieurs, techniciens et ouvriers. L'organisation générale du chantier est composée d'équipes de nettoyage du support, de pose de grillage, de pose du joint de dilatation, de pose de règles d'épaisseur, de projection-lissage du mortier, de dépose de règles.



Un plan rigoureux d'assurance qualité a été mis en place avec des relevés quotidiens de points de fixations du grillage, d'essai d'arrachement des chevilles ( 100 daN / unité), d'espacement du support pour les écarter le grillage, de relevé d'épaisseur du mortier. Mais aussi des prélèvements de mortier afin de mesurer sa densité, sa perte au feu, sa résistance à la compression. Des tests d'adhérence in situ sont réalisés chaque semaine par IFS, et par le Client.



## INNOVATIVE FIRE SYSTEMS. PROTECTION PASSIVE INCENDIE

### Les joints de dilatation : le point faible du tunnel en cas d'incendie de 300 MW

Les points de contacts des segments du tunnel immergé, sont composé d'un caoutchouc a très forte résistance à la compression – Ces joints n'en demeurent pas moins peu résistant à l'élévation de température. Les mouvements de dilatation estimés par les concepteurs démontrent une grande élasticité de l'ensemble de la partie immergée de 670 mètres. Le client souhaite entretenir une bonne visibilité à l'intérieur du tunnel.



Les joints de dilatation ont fait l'objet d'une recherche commune entre Statens Vegvesen (le ministère des routes norvégiennes) et INNOVATIVE FIRE SYSTEMS, pour arriver à satisfaire toute la problématique complète de ces joints entre segment de la partie immergée du tunnel.

- Le waterstop composé d'un caoutchouc très performant ne pourra supporter une température au delà de 80 degrés, avec une exposition au feu RWS constante
- La dilatation maximale estimée par les concepteurs est d'une amplitude de 3.5 cm au milieu du tunnel.
- La maintenance du tunnel sera réalisée par deux lavages annuels à haute pression (150 bars à 50 cm).



Pour répondre à ces contraintes, IFS a validé avec le client un assemblage de produit résistant à une exposition permanente à 1350 degrés composé de différents composants préfabriqués et projetés.



**INNOVATIVE. FIRE. SYSTEMS.**



## **TUNNEL IMMERGE**

### **BJORVIKA à OSLO**

**COMMENT SE REALISE LA PROTECTION AU FEU LA PLUS EXIGEANTE AU MONDE**

**TUNNEL IMMERGE de BJORVIKA – PROTECTION AU FEU avec le FIRE BARRIER 135**