

# Réparation en moins de quatre mois du tunnel sous la Manche après l'incendie de septembre 2008

Christian MAQUAIRE - EUROTUNNEL  
Philippe ZANKER, Bertrand PETIT - FREYSSINET  
Véronique MAUVISSEAU, Michel KAHAN - SETEC

## Résumé

L'incendie qui s'est déclaré à bord d'une Navette transportant des camions le 11 septembre 2008 dans le tube nord du tunnel sous la Manche, à 11 km du portail France, a endommagé la voûte en béton sur une longueur de 760 m (très sérieusement sur une section d'une centaine de mètres), et a nécessité le remplacement des équipements sur environ 2 km. Eurotunnel a rapidement remis la liaison entre le continent et la Grande-Bretagne en service en organisant la circulation des trains dans les cinq intervalles du Tunnel non touchés par l'incendie, puis a procédé au démantèlement de la navette incendiée et au déblaiement de la zone endommagée. En parallèle, Eurotunnel s'est adjoint les services de Setec pour la maîtrise d'œuvre et de Freyssinet à la tête d'un groupement de sociétés du groupe Vinci pour les travaux de réparation. Les travaux se sont déroulés dans un temps record de moins de 4 mois à compter du 15 octobre.

Pour parvenir à cet objectif de délai ambitieux, il a fallu mobiliser des moyens quelque peu exceptionnels, industrialiser les process tout en conservant une forte adaptabilité

## 1 - L'INCENDIE ET LA REMISE EN EXPLOITATION PARTIELLE

Le jeudi 11 septembre 2008 à 15h55, une navette transportant des camions prend feu dans l'intervalle 6 du tunnel sous la Manche, à 11 km de la sortie côté France (voir figure 1). L'incendie est immédiatement détecté et les 32 personnes à bord aussitôt évacuées dans le tunnel de service, toutes saines et sauvées.

Une fois le feu éteint, Eurotunnel procède à l'inspection complète du tunnel ferroviaire Sud non affecté par l'incendie. Le service commercial reprend progressivement, trente heures à peine après le début du sinistre. D'abord uniquement dans le tunnel Sud, puis, après un nettoyage approfondi, de minutieuses inspections de sécurité et une série de tests, successivement dans les intervalles 2 et 4, les 22 et 28 septembre. Jusqu'à 200 trains empruntent ainsi le tunnel chaque jour, ce qui représente 60 % de l'activité normale ; une situation qui durera jusqu'à la fin des travaux de réparation.

Le 1<sup>er</sup> octobre, la Justice autorise l'accès à la navette incendiée. Les équipes d'Eurotunnel mettent en place un ingénieux système

comprenant cinq camions aspirateurs juchés sur des wagons plats pour collecter les débris de l'incendie et dégager les carcasses. En 14 jours, tous les éléments de la navette sont sortis du tunnel et l'intervalle 6 est déblayé (photo 1). Les travaux de réparation peuvent commencer.



Photo 1

## 2 - DIAGNOSTIC ET ETUDES PREALABLES

L'analyse des dégâts causés à la structure de l'ouvrage a permis de délimiter les zones endommagées :

- Génie Civil : la zone endommagée s'étend sur une longueur de 760 mètres entre les PK 48 130 et 48 890. Une zone

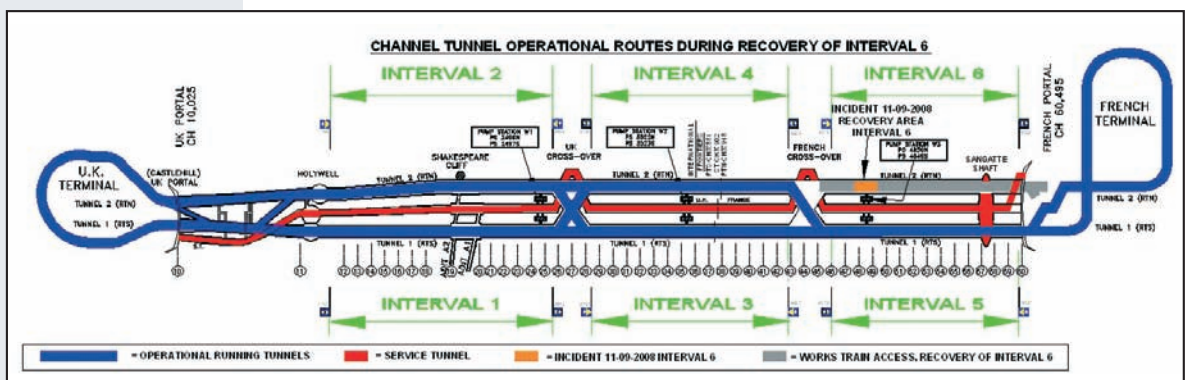


Figure 1

du chantier. Le pilotage serré de l'opération, tant dans l'espace que dans le temps, au travers notamment d'une forte collaboration entre les acteurs, l'anticipation des achats des fournitures critiques et l'information régulière du comité de sécurité de la Commission Inter-Gouvernementale - qui a donné son feu vert pour la réouverture au service commercial le 9 février 2009, ont été des éléments déterminant de la réussite de ce projet.

### Abstract

REPAIR WORKS -IN LESS THAN 4 MONTHS- IN THE CHANNEL TUNNEL AFTER THE SEPT. 2008 FIRE

The fire that burst out on a shuttle train on September 11, 2008, in the tunnel under the Channel (interval 6, north tube) caused mild to severe damage to the concrete lining over 760 m and required the replacement of electromechanical equipments over 2km, some 11 km away from the French portal. Eurotunnel quickly restored commercial services in the five intervals that have not been hit by the fire. Then its team brought the fire-damaged Shuttle out of the running Tunnel and collected all the debris in the damaged zone. Eurotunnel appointed Setec as project manager and Freyssinet as civil work contractor and leader of a consortium within the Vinci group to perform all the repair works. The works were performed in less than 4 months, starting October 15th. Such a short schedule required a strong collaboration between the owner, the engineer and the contractors who worked on a 3 shift basis every single day, well planned purchasing of rare supplies (such as 21kV cable or special anchors) as well as regular information of the Safety Committee of the Intergovernmental Commission which gave the green light for the reopening to commercial traffic on February 9th, 2009.

plus touchée de 90m et une zone extrêmement touchée - avec parfois disparition quasi complète d'une partie du voussoir - d'une longueur de 16m située entre les PK 48 417 et 48 433.

- Equipements fixes : les matériels existants ont subi des dommages sur une longueur de 2 km environ, principalement entre les PK 47 300 et 49 300.

### 2.1 - Diagnostic génie civil

Le diagnostic visuel du génie civil a été complété par 3 modes d'investigations : essais en laboratoire à partir d'échantillons, investigation géométrique et essais in situ.

#### Essais en laboratoires :

Compte tenu du nombre important d'échantillons à analyser, plusieurs laboratoires ont été sollicités pour réaliser les essais. Les essais ont eu pour objectif de :

- Caractériser la craie dans la zone de l'incendie : une centaine de carottes a été prélevée au niveau de la zone endommagée pour évaluer la qualité du massif environnant l'ouvrage.
- Caractériser le béton de voussoir et le mortier de bourrage dans la zone incendiée. Le béton de voussoir a particulièrement bien vieilli puisqu'il affiche une résistance moyenne à la compression de 81 MPa alors que sa résistance visée lors de la construction était de 55MPa. Avec les essais réalisés sur le béton de structure et de bourrage, il a été possible de valider les valeurs de module, de résistance à la compression et à la traction prises par anticipation dans le modèle de calcul du revêtement.
- Vérifier que les caractéristiques chimiques et mécaniques des armatures restant en place n'ont pas été altérées afin de statuer sur la possibilité de les conserver lors de la réparation du revêtement.

L'essai au microscope électronique à balayage (MEB) couplé à une analyse qualitative par spectrométrie X à dispersion d'énergie (EDS) de divers échantillons a permis dans un premier temps d'évaluer l'épaisseur de béton altéré restant après l'incendie, puis de vérifier, dans un deuxième temps, l'efficacité de la purge du béton par hydrodécapage, sur une nouvelle série de carottes.

#### Géométrie :

Trois levés scanners ont été réalisés au cours du chantier :

- Levé scanner #1 - état zéro du tunnel après incendie : ce levé constitue la base

de travail permettant de définir grossièrement les dégradations types, les épaisseurs résiduelles de béton, de façon à définir la réparation du revêtement à mettre en œuvre et une estimation des quantités (béton projeté, armature...) nécessaires aux commandes de l'entreprise.

- Levé scanner #2- état après hydrodécapage : permet de définir le volume de béton retiré par l'hydrodécapage et d'affiner le zoning des réparations ainsi que les quantités.

- Levé scanner #3 - état après réparation du revêtement et pose des équipements : ce levé constitue un état zéro du tunnel réparé ; il permet de vérifier les réparations (enrobage des armatures et épaisseur de béton projeté mis en place) et de confirmer le gabarit dynamique (également validé par le passage d'un gabarit physique).

Des mesures de convergences durant les travaux ont permis de suivre la stabilité géométrique du tunnel durant les différentes phases de réparation. Aucun mouvement significatif n'a été détecté.

Essais in situ : des essais de relâchement de contraintes ont été réalisés dans les locaux de la station de pompage W3 de façon à déterminer l'état de contrainte de certaines sections d'ouvrages à géométrie complexe difficilement accessible par le calcul. Les résultats obtenus ne montrent pas de niveau de contrainte non admissible dans le béton de la station de pompage.

### 2.2 - Diagnostic équipements

La maîtrise d'oeuvre des équipements a été réalisée par Systra associé à Setec et Inexia. Les dégâts suivants ont été constatés (photo 2) :



Photo 2

- sur les équipements caténaux : 3 tirs,
- les équipements de signalisation se trouvant entre le PK 48 300 et le 48 450 ont été totalement détruits. Les câbles de signalisation se trouvant dans le trottoir

d'évacuation, par contre, ne semblent pas avoir subi de dommages apparents,

- les équipements de contrôle et commande dont les systèmes radio de la zone centrale de l'incident ne fonctionnent plus,
- les chemins de câbles en MODAR dans la zone centrale de l'incendie sont réduits à l'état de fibres ; en limite de zone incendiée, certains câbles présentent des boursofflures apparentes, l'ensemble des colliers d'attache des câbles 21 et 3.3 kV a fondu,
- certains coffrets électriques situés dans les rameaux de pistonement ont été détériorés ; les câbles correspondants ont été endommagés dans la zone de l'incendie,
- les supportages ne sont plus assurés,
- les équipements mécaniques ont également souffert, notamment les tuyaux de refroidissement (cooling), main courante.

En plus du constat visuel, le diagnostic des équipements a été complété par des tests fonctionnels, des expertises destructives ou non destructives selon les cas, et par comparaison avec une simulation par le calcul des températures atteintes dans le tunnel.

Les principaux tests mécaniques ont consisté en :

- des essais des ancrages et des supports,
- pour les rails : des tests de dureté et des mesures de contraintes par les services techniques d'EUROTUNNEL et IG SNCF laboratoire des rails et le passage du véhicule de contrôle « MAUZIN »
- pour les blochets et inserts béton ainsi que pour les semelles et les chaussons élastiques des blochets de voie : tests de résistance et de traction par le CEBTP SOLEN, SNCF IG laboratoire des rails et par le CETIM,
- pour la caténaire : des échantillons des câbles contact, porteur, et feeder, ainsi

que des bras de rappel, ont fait l'objet d'essais de traction et de mesures d'allongement à la rupture,

- pour la signalisation ferroviaire : expertise des câbles par IGSF et LCIE,
- pour les câbles électriques : expertise par SILEC Câbles,
- pour la canalisation réseau incendie DN400 et cooling: expertise peinture par EMTS,
- pour la canalisation cooling DN400 : tests mécaniques réalisés par l'Institut de Soudure,
- ventilation : contrôle de la planéité et de l'intégrité des viroles et des portes.

Une simulation thermique a permis de comparer le résultat des diverses analyses aux évolutions probables de la température dans le tunnel lors de l'incendie, afin de s'assurer qu'au-delà des limites géographiques de remplacement, les équipements n'ont pas été soumis à une ambiance dont la température a été supérieure à celle pour laquelle ils ont été conçus.

La simulation numérique a été réalisée à l'aide d'un modèle aérothermique monodimensionnel du tunnel (Express'air de Setec). Cette simulation s'appuie sur une estimation de la cinétique de l'incendie à partir des données relatives aux chargements et les courbes standardisées de puissance d'incendie de poids lourds éditées par le CETU dans le cadre de l'Etablissement des Etudes Spécifiques de Danger en tunnel. Cette simulation prend également en compte la chronologie des événements pendant toute la durée de l'incendie. En particulier les régimes de la ventilation NVS et SVS et les ouvertures des CP (Cross Passage).

En outre la simulation prend en compte la limite potentielle maximale de puissance de l'incendie compte tenu de l'apport possible en oxygène contenu dans l'air de ventilation.

Ce calcul numérique a permis d'établir une courbe théorique enveloppe de l'évolution des gaz au-delà de la zone portant les foyers (figure 2).

L'analyse montre que la température des gaz donnée diminue rapidement le long du tunnel pour atteindre une valeur de 100°C maximum à environ 550 m de l'extrémité de la rame incendiée. Cette courbe confirme les constats et les expertises réalisés sur les différents équipements, en particulier l'expertise des câbles faite par la société SILEC Câble et l'expertise sur les câbles caténares effectuée par le CETIM.

### 2.3 - Etudes préalables

Des études préalables, lancées quelques jours après l'incendie, ont consisté à :

- vérifier la tenue du tunnel en l'état après incendie,
- vérifier que les réparations envisagées, par reconstitution du voussoir en béton projeté, sont correctes.

Les calculs ont été effectués suivant la méthode « convergence - confinement ». Ils ont été menés à l'aide d'une modélisation bidimensionnelle aux éléments finis en déformations planes à l'aide du programme CESAR-LCPC.

L'incendie a eu lieu au droit de la station de pompage W3 au voisinage de laquelle deux sections type sont présentes (figure 3) :

- Une section à 3 tubes, les tunnels ferroviaires étant distants de 15 m du tunnel de service (géométrie identique à celle étudiée lors de l'incendie de 1997);
- Une section à 5 tubes comprenant les tunnels ferroviaires (distants de 20 m du tunnel de service) ainsi que les deux galeries d'équipements (situées entre les tunnels ferroviaires et le tube de service).

Deux hypothèses de comportement ont été envisagées :

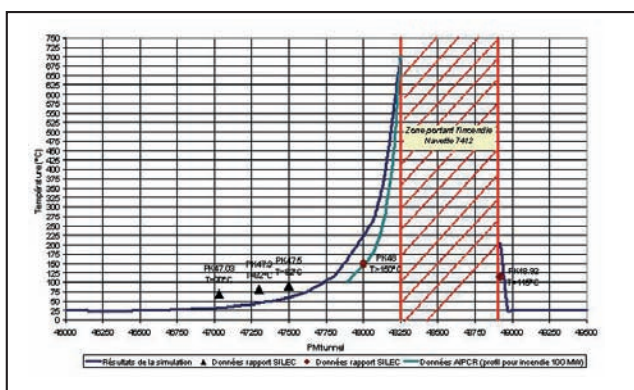


Figure 2

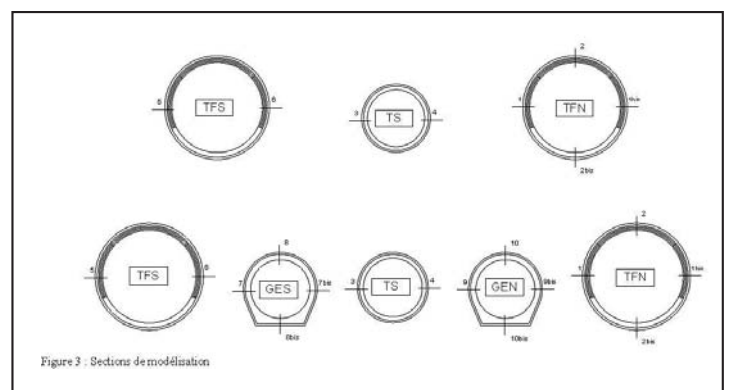
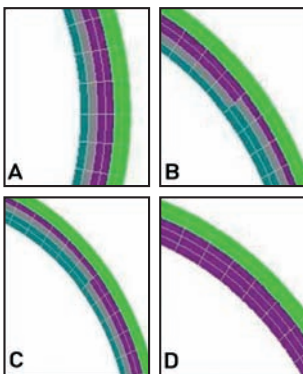


Figure 3

- Le revêtement a perdu son chargement au cours de l'incendie et il ne récupère de nouveaux efforts après incendie que par le biais des nouvelles déformations différées de la craie ; ces nouveaux efforts sont supportés soit par le béton résiduel seul, soit par le revêtement composite formé du béton résiduel des voussoirs et du béton projeté de réparation, soit par le béton projeté seul. Ce cas est le plus défavorable pour les revêtements des galeries voisines.

- Le revêtement a conservé son chargement au cours et après l'incendie. Ce cas théorique, défavorable pour le revêtement réparé, est simulé en calculant les efforts dans le revêtement composite comme s'il avait été mis en place à l'arrière du tunnelier au moment du creusement supposé se produire avec les autres galeries déjà creusées et revêtues.

Diverses positions d'altération et d'épaisseur altérées ont été envisagées, par série de 10cm (cas A à D).



Mortier  
 Béton résiduel  
 Béton projeté  
 Béton inactif

En fonction des incertitudes sur le module d'Young au moment des calculs et des 3 points ci dessus, 38 calculs ont dû être effectués.

### 3 - PRINCIPES DE REPARATION DU GENIE CIVIL

#### 3.1 - Classes de réparation, performances requises du béton

La réparation du revêtement a été effectuée selon 6 classes de traitement, définies en fonction de l'épaisseur « e » de béton manquant (figure 4) :

Classe	Epaisseur manquante	Epaisseur résiduelle	Réparation
1	$e \leq 1$ cm	39 cm mini	Minéralisation
2	$1 \text{ cm} < e \leq 2$ cm	34,5 à 39 cm	Mortier de ragréage + grillage de carreleur (photo 9)
3A	$2 \text{ cm} < e \leq 4,5$ cm	35,5 à 38 cm	Béton projeté + ajout d'aciers HA8 sur les joints + grillage de carreleur
3B	$4,5 \text{ cm} < e \leq 15$ cm	25 à 35,5 cm	Béton projeté + aciers HA8 filants sur 3 voussoirs + renfort vertical HA12 (photo 10)
3C	$15 \text{ cm} < e < 36$ cm	4 à 25 cm	idem classe B + épingles HA8 esp 24 x 24 cm
3D	$e \geq 36$ cm	Moins de 4 cm	idem classe D + épingles HA8 recourbées derrière ferrailage extradossés

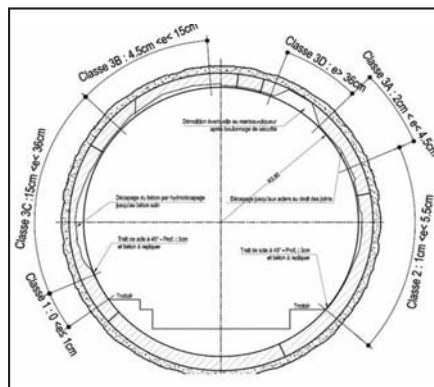


Figure 4

#### 3.2 - Formulation et essais de convenue du béton

L'expérience acquise en 1997 et le savoir-faire de l'entreprise ont fortement orienté le choix de la technique du béton projeté par voie sèche pour réaliser la reconstruction des 10 000 m<sup>2</sup> de voussoirs endommagés par l'incendie.

Les délais du chantier ne permettaient pas d'entreprendre des études de formulation (mise en œuvre prévue 6 semaines après le démarrage du chantier).

Freyssinet, assisté de ses experts, a donc choisi de formuler un béton à partir d'une composition connue et couramment utilisée par ses équipes en s'appuyant sur un fournisseur capable de respecter le cahier des charges en termes :

- de qualité : propreté des granulats :
  - Sable 0-4 : module de finesse européen selon la norme EN12620 : valeur mini = 2,92 valeur maxi = 3,52 ;
  - Sable 4-8 : teneur en fines selon normes 933-1 = 1,5 % maxi
- bilan des alcalins < 3,00 kg/ m<sup>3</sup>

- de délais : livrer 4 000 t de béton en 2,5 mois tout en incluant les périodes de maintenance de l'usine de production programmées durant les fêtes de fin d'année.

Le 20 octobre 2008, il a été testé à Montluel (01) deux formules de bétons projetés dans des caisses conformément aux règles de l'ASQUAPRO.

Le 27/10/08, la lecture des résultats d'essais à la compression sur les éprouvettes réalisées à partir des caisses d'essais confirme que les montées en résistance des bétons non fibrés sont conformes aux prévisions et doivent atteindre les 55 MPa à 28 jours requis dans le cahier des charges alors que le béton fibré n'atteint pas cette valeur. La solution béton fibré est abandonnée et la production des 4 000 big-bags d'une tonne lancée.

Un atelier d'essais est installé à l'extérieur du tunnel pour organiser un stage de remise à niveau pour les 32 porte-lances certifiés ASQUAPRO mobilisés pour le chantier.

Les délais de fabrication et de mobilisation du matériel de projection ne permettent pas la réalisation d'essais de convenue dans le tunnel pour avoir des résultats à 28 jours avant le lancement de la campagne de mise en œuvre des bétons. La décision est prise de réaliser une série de caisses par jour avec un projeteur différent pour suivre la régularité de la montée en résistance à jeune âge (2 jours et 7 jours) et la constance des porte-lances. La projection des zones les plus fortement dégradées ne commence que 14 jours après les premières projections et ce avec des résultats d'essais à 7 et 14 jours prometteurs.

Un organisme de contrôle externe est mobilisé pour suivre 7 j/ 7j le programme de contrôle élaboré pour ce chantier.

## 4 - INSTALLATIONS DE CHANTIER ET LOGISTIQUE

### 4.1 - Installations extérieures

Afin d'optimiser les travaux, Eurotunnel a réalisé des aménagements importants à l'extérieur du Tunnel :

- Une base vie à proximité de l'entrée du tunnel pour accueillir les responsables d'Eurotunnel, de la Setec et des entreprises travaillant sur le chantier.
- Une base travaux à quelques centaines de mètres du site. Vestiaires et douches sont mis à disposition des ouvriers.
- Un wagon voyageur disposant de 100 places assises spécialement acheté pour acheminer les ouvriers sur le chantier (photo 3). Ce wagon, attelé à un train de travaux, fait la navette à chaque relève d'équipe, soit trois fois par jour (à 8h, 16h et minuit), entre la station construite près de la base et la zone des travaux.
- Une aire de 5 000 m<sup>2</sup> située le long de la voie ferrée (voie 36) pour la préparation et le chargement des équipements sur les trains de travaux.
- Un terrain d'une superficie de 3 hectares à proximité de la zone de maintenance d'Eurotunnel pour stocker le matériel, notamment les tuyaux du système de refroidissement.



Photo 3

Les installations extérieures propres à l'Entreprise au niveau des voies 36 se limitent à une zone atelier / magasin et une zone de stockage tampon des big-bags de béton à proximité des trémies de chargement des wagons citerne EVS.

Dans la zone portuaire de Calais, 6000 m<sup>2</sup> d'entrepôt ont été loués pour stocker les 4 000 t de béton livrées avant les travaux de projection.

### 4.2 - Ventilation de chantier

Compte tenu du besoin d'utiliser des matériels consommateurs de fuel, la ventilation de chantier est un point primordial pour la réalisation des travaux.

L'alimentation en air du chantier est assurée par la mise en surpression du tunnel de service et décompression en intervalle 6 au travers de cross passages (CPDs) ouverts. La fermeture aux déperditions est assurée par la mise en place d'un sas côté UK du tunnel et d'un sas chantier entre le tunnel de service et le tunnel ferroviaire. (fig. 5)

La ventilation est dimensionnée pour assurer un courant d'air à une vitesse moyenne de 2 m/s. Cependant, le pistonement dû à l'exploitation des trains dans le tunnel et les défauts d'étanchéité conduisent à des variations de vitesse ressenties sur le chantier. Les chefs d'équipe étaient équipés de détecteur de CO durant les phases nécessitant de nombreux engins (hydrodécapage, projection en particulier).

## 5 - DEROULEMENT DES TRAVAUX

### 5.1 - Commande de matériel

Il faut souligner que les services d'EUROTUNNEL ont approvisionné dès l'incident des équipements alors que le diagnostic final n'était pas établi. Compte tenu des délais de livraison et afin d'éviter toute rupture de stock gravement préjudiciable aux délais de remise en état, cet approvisionnement a dû être établi avec une certaine marge d'appréciation.

### 5.2 - Mise en sécurité par boulonnage

#### 5.2.1 - Principes

Le clouage réalisé répondait à la mise en sécurité du personnel de chantier et au

serrage des terrains pour garantir la stabilité de l'ouvrage :

- Clouage des voussoirs pour éviter leur chute ;
- Clouage du terrain dans les parties où les voussoirs très fracturés ne garantissent plus la stabilité du massif.

Les boulons (ou clous) n'ont plus d'utilité dès lors que la voûte en béton est reconstituée.

La dimension des clous (longueur de 3 m) résultant de l'expérience est calée au 1/3 du diamètre de l'excavation initiale du tunnel. Leur densité permet de reprendre environ 1 bar de pression soit 10t/m<sup>2</sup>, soit environ 1 boulon de diamètre 20 mm par m<sup>2</sup>.

Les boulons utilisés par l'entreprise sont de type Mix Bolt type BCH de diamètre 22 ou 20 mm.

Un relevé géométrique a été réalisé régulièrement pour détecter tout mouvement de la structure. Les résultats montrent que les convergences tout au long du chantier sont restées inférieures à 2 mm, c'est-à-dire dans la tolérance de mesure. Le mouvement du massif de la craie, qu'on aurait pu craindre initialement, ne s'est pas produit. La qualité du massif a également été confirmée par les essais sur carottage.

#### 5.2.2 - Mise en œuvre

Deux trains travaux ont été constitués pour les ateliers de mise en œuvre des clous de confortement de la voûte. Ces trains ont finalement travaillé depuis chaque extrémité de la zone génie civil pour se rejoindre vers la zone fortement dégradée.

Chaque convoi comportait un Jumbo équipé d'un marteau Tamrack hydastar 200 travaillant en roto-percussion et d'une centrale de malaxage et d'injection des clous (photo 4).

42 postes ont été nécessaires pour la mise en œuvre des 1072 boulons d'ancrage.

### 5.3 - Mise en place de la piste

La solution pour tenir les délais passant par une amélioration significative de la produc-

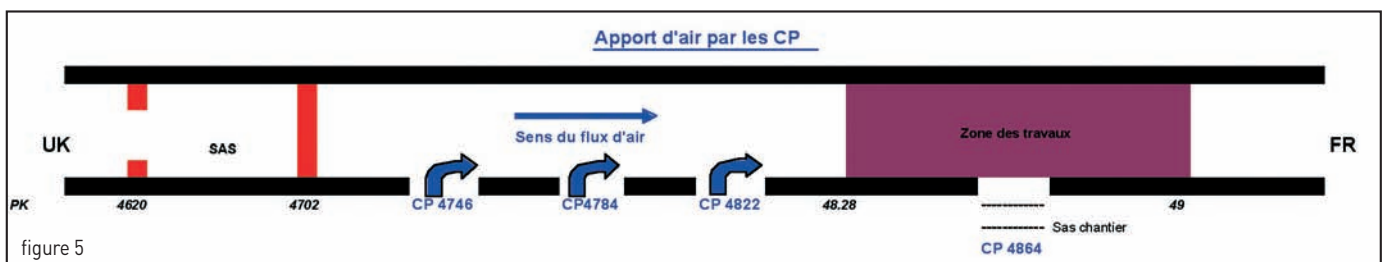


figure 5



Photo 4

tivité, elle sera rendue possible par l'une des innovations principales du chantier : le remblaiement de la voie ferrée et l'aménagement d'une piste provisoire pour faciliter et sécuriser la circulation des hommes et des engins (photo 5). La construction de cette piste a été essentielle ; elle a facilité le déroulement des étapes suivantes du chantier en autorisant la mise en œuvre de la majeure partie des autres innovations.



Photo 5

Eurovia Travaux Ferroviaires (ETF) a déversé avec des wagons auto-déchargeables (WAD) 3 500 t de ballast sur le béton de voie entre les trottoirs latéraux et posé 2 400 traverses de chêne ignifugées pour constituer une piste routière de 630 m de long. Cette piste a été dotée d'un quai de déchargement à chaque extrémité.

### 5.4 - Hydro-démolition

Comment décaper 12 000 m<sup>2</sup> de voûte en 21 jours en industrialisant cette tâche particulièrement pénible si elle est réalisée manuellement ?

La deuxième innovation du chantier y répond : l'hydro-démolition : 5 robots type Conjet sont mobilisés (photo 6). Grâce à la piste, les robots peuvent facilement se déplacer sur l'ensemble de la zone de travaux.



Photo 6

Les hautes pressions des jets et la vitesse d'avancement des robots ont été adaptées grâce à des essais de convenance pour que la démolition des bétons dégradés permette d'atteindre un béton sain (enlèvement des zones sonnant le creux et de résistance mesurée au scléromètre < 55 MPa) tout en dégageant les armatures des voussoirs pour répondre aux règles de l'art des réparations en béton projeté (photo 7).

Photo 6



Photo 7

Des travaux de parachèvement à la lance THP (3 000 bars) et au marteau pneumatique ont complété la préparation de surface au droit des joints entre voussoirs.

Les 900 tonnes de gravats ont été extraites lors des phases de maintenance des groupes UHP.

### 5.5 - Ferrailage et béton projeté par voie sèche

Pour favoriser la co-activité entre les différents corps d'état et répondre aux enjeux de délais, la pose d'un échafaudage continu de 500 m (3 000 m<sup>2</sup> de plancher)



Photo 8

permettant l'accès à toute la surface de la voûte tout en autorisant la circulation du personnel et des engins en toute sécurité est préférée à la mise en œuvre des plates-formes initialement prévues (photo 8). La troisième innovation du chantier est une des clefs du succès de l'opération. Elle n'a aussi été possible que grâce à la piste.

Des relevés manuels ou par scanner avant et après l'hydro-démolition ont confirmé le tonnage de 4 000 tonnes de béton à mettre en œuvre. L'engagement de réaliser un chantier « hors poussière » a forcé l'entreprise à innover en concevant et fabriquant des ateliers de béton projeté et de transport des matériaux répondant aux contraintes de délais. Cette « usine » à béton est la quatrième innovation du chantier.

Trois silos de stockage ont été installés dans le tunnel en extrémité de piste côté France ; ils sont approvisionnés par pulsage depuis un wagon-citerne, et, de là, le matériau sec est acheminé sur 450 m, également par pulsage depuis un container atelier comprenant une trémie de 10 m<sup>3</sup> et deux machines à projeter, jusqu'aux deux ateliers de béton projeté qui progressent depuis l'extrémité du chantier côté Angleterre en suivant les ferrailleurs. Chaque atelier de projection est équipé de 2 machines, d'un silo tampon et d'un dispositif de dépoussiérage et de récupération des fines. L'ensemble de la chaîne de transport des bétons est automatisée et ne nécessite que la présence d'un machiniste par atelier.

Préalablement à la mise en œuvre du béton, le ferrailage des voussoirs est reconstitué dans les zones endommagées et complété pour mettre en place un maillage de 12 cm x 12 cm pour compléter le ferrailage existant et ponter les joints de voussoirs. Ces 40 000 kg d'armatures de diamètre 8 ou 12 mm ont été posés manuellement et ont nécessité la pose de 39 000 connecteurs et épingles.

Des gabarits sont posés sur le ferrillage et contrôlés par un géomètre pour respecter les tolérances géométriques du gabarit ferroviaire.



Photo 9

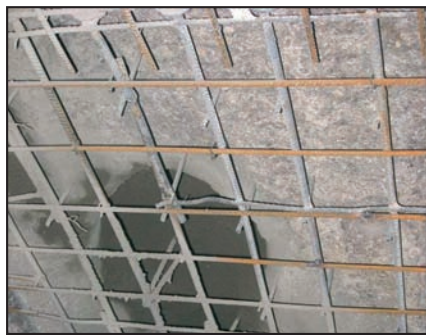


Photo 10

Le béton projeté est mis en œuvre par passes de 10 à 12 cm sur des épaisseurs de 10 à 40 cm avant réalisation d'une couche de finition de 3 cm dressée à la règle. Les distances de projection sont limitées à 120 m de part et d'autre des ateliers de béton projeté ce qui nécessite le déplacement de ces équipements en cours de chantier pour la réalisation des 760 m de travaux (photo 11).



Photo 11

Les anneaux sont reconstitués par groupes de 3, un sciage annulaire matérialise les zones de fissuration privilégiées non ferrillées et des forages de décharge sont réalisés en piédroit pour limiter la pression hydrostatique sur la voûte reconstituée.

La technique du béton projeté voie sèche a encore prouvé que pour répondre à de telles contraintes de délais, de performance des bétons, de géométrie de la structure, elle était la plus adaptée pour ces réparations en tunnel à 11 km du « jour ».

La pose des supports d'équipements a eu lieu dès la prise du béton, à 2 jours. (photo 12)



Photo 12

### 5.6 - Retrait de la piste

Cinq jours ont été nécessaires pour la dépose de la piste dès la fin des travaux de Génie Civil. ETF a mobilisé des wagons WAD auto-chargeables et un atelier suceur affrété depuis l'Autriche (photo 13). Cette opération a été réalisée en deux temps afin de réduire les délais des équipements en favorisant l'accès des trains travaux côté UK durant la fin des travaux de Génie Civil côté France.



Photo 13

### 5.7 - Pose des équipements

Les supports d'équipements ont été posés à partir de l'échafaudage dans la continuité immédiate du chantier de béton projeté. La

pose des équipements proprement dits a été réalisée à partir de moyens ferroviaires après le retrait de la piste. On peut noter les points forts suivants :

- déroulement des câbles 21 kV (photo 14),

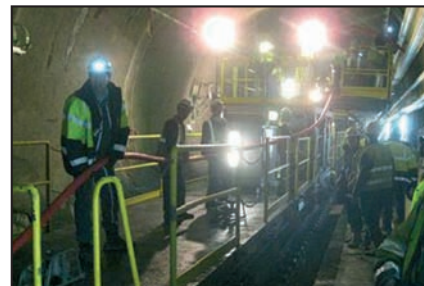


Photo 14

- tirs caténaïres (photo 15),



Photo 15

- pose des conduites de cooling par longueur de 96 m ayant nécessité la mise au point de matériel spécifique (photo 16). C'est la cinquième innovation du chantier.



Photo 16

### 5.8 - Contrôles, essais et réception

Un suivi 24h/24h a été assuré pendant ces travaux.

En ce qui concerne le béton, tous les projeteurs ont passé une certification ASQUAPRO au démarrage du chantier. Des caisses de béton projeté ont été réalisées et les carottes extraites de ces caisses ont été écrasées à 2, 7, 14 et 28 jours

durant l'exécution de l'opération de projection. Une campagne de prise de carottes sur le revêtement achevé a été réalisée afin d'exécuter des essais de compression à 28 jours ainsi que des essais d'adhérence.

En ce qui concerne les équipements, les procédures de tests intermédiaires, d'essais de réception partielle, d'acceptation et d'achèvement se sont appuyées sur les procédures d'origine (construction), ajustées lors de la réparation de l'intervalle 3 en 1997, ou pour les activités de maintenance.

Enfin, des véhicules de test à l'achèvement ont circulé :

- Véhicule d'enregistrement MAUZIN, pour le contrôle de la voie,
- Véhicule gabarit, pour le contrôle de la géométrie.

Une instrumentation à long terme a été mise en place pour suivre les déformations de la voûte : 9 capteurs à corde vibrante avec suivi électronique et cibles topographiques.

## 6 - ORGANISATION

Dès le départ, la réflexion s'est portée sur le développement d'une méthodologie innovante permettant l'industrialisation des process.

La réussite d'un tel projet est ensuite le résultat, à la fois des prouesses techniques réalisées par les entreprises et d'une organisation performante de l'ensemble des acteurs mobilisés autour d'un même objectif.

Ce sont tout d'abord des moyens humains peu ordinaires qui ont été mobilisés avec très peu de préavis sur le chantier (voir encart) en trois postes, sept jours sur sept, Noël et Nouvel an compris.

Il s'agit ensuite d'un projet intégré autour d'une collaboration très étroite entre maître d'ouvrage, maître d'œuvre et entreprises, rassemblés sur une même base vie. La communication était volontariste avec une réunion de coordination quotidienne (week-end et jours fériés compris), voire deux réunions par jour pendant les phases de lancement.

Si chacun a su conserver son rôle et sa place dans l'organisation, les délais ont fortement poussé les acteurs à travailler ensemble sur la mise au point des techniques de réparation, des procédures et l'organisation dans l'espace et le temps des différents travaux.

Parmi les facteurs qui ont largement contribué à la tenue des objectifs de délais, on trouve :

- Le retour d'expérience des acteurs de l'incendie de 1996 ;
- Les commandes des fournitures critiques (câbles 21 kV, 3.3 kV, ...), anticipées par Eurotunnel dès avant la signature des marchés de travaux ;
- Les pré-diagnostic permettant de caler les commandes de béton et d'équipement ;
- Les réunions de coordination quotidiennes où sont abordées les questions de sécurité, et d'avancement ;
- Une cellule de coordination et de sécurité en charge de définir et d'optimiser la logistique dont l'agencement des trains du chantier ferroviaire en tunnel ;
- La coordination et la mise au point sur le terrain des techniques pratiques de mise en œuvre, entre maître d'œuvre et entreprises sous l'œil averti des spécialistes d'Eurotunnel ;
- La coordination entre les bureaux où se mûrissent les décisions et le chantier à 11km dans le tunnel.
- La coordination au sein du groupement d'entreprises entre le génie civil et les équipements,

- Des réunions hebdomadaires du Comité de Sécurité de la Commission intergouvernementale (CIG) qui ont permis d'informer régulièrement les experts du déroulement des travaux. Cela a été un atout pour le traitement serein des questions techniques à l'avancement et la remise en service de l'infrastructure sans heurt.

## 7 - CONCLUSION

Alors que l'enquête judiciaire en cours n'a, à ce jour, pas encore établi les causes de l'incendie, Eurotunnel a, de son côté, d'ores et déjà recherché et mis en œuvre de nouveaux moyens pour éviter un nouvel incendie dans le tunnel sous la Manche et, le cas échéant, pour en limiter les conséquences. Les chauffeurs routiers ont ainsi été particulièrement sensibilisés aux sources potentielles d'incendie. Plus encore, Eurotunnel, assisté de Setec, travaille actuellement avec des sociétés spécialisées sur l'installation de stations d'extinction en tunnel ferroviaire capables de disperser un brouillard d'eau ciblé. Le concept est innovant et le planning, là encore, ambitieux. ●

### ▶ LES EFFECTIFS

Au total, plus de 800 hommes ont travaillé sur le chantier.  
A noter qu'aucun accident de travail majeur n'est à déplorer.

### ▶ LES PRINCIPALES DATES

- **11 septembre 2008** : incendie d'une Navette Camions dans l'intervalle 6 du tunnel sous la Manche
- **13 septembre** : reprise de la circulation des trains dans le tunnel Sud.
- **22 septembre** : reprise de la circulation des trains dans l'intervalle 2 du tunnel Nord
- **28 septembre** : reprise de la circulation des trains dans l'intervalle 4 du tunnel Nord.
- **1<sup>er</sup> octobre** : sortie du premier tiers de la navette endommagée.
- **10 octobre** : approbation des contrats pour la rénovation de l'intervalle 6 du tunnel sous la Manche. La maîtrise d'œuvre est confiée à Setec et les travaux à un groupement d'entreprises comprenant Freyssinet Entrepreneur général Mandataire, Eurovia Travaux ferroviaires, Vinci Energies.
- **14 octobre** : sortie de la locomotive de queue de la navette endommagée.
- **18 octobre 2008** : début des travaux de réparation.
- **9 janvier 2009** : fin du bétonnage.
- **9 février 2009** : réouverture complète du tunnel sous la Manche, reprise du trafic commercial dans l'intervalle 6.