

TUNNELS FERROVIAIRES

La voie béton, solution pour améliorer
la sécurité des usagers
et l'intervention des secours



Les contributions à l'ouvrage

<i>Serge</i>	<i>HORVATH</i>	<i>Cimbéton</i>
<i>Jean-François</i>	<i>SCHMAUCH</i>	<i>Colonel (er) de Sapeurs-pompiers</i>
<i>Pierre</i>	<i>GARIOUD</i>	<i>Lieutenant-colonel de Sapeurs-pompiers</i>
<i>Jean-Marc</i>	<i>POTIER</i>	<i>SNBPE</i>
<i>Christophe</i>	<i>CHEVALIER</i>	<i>AGILIS</i>

avec la participation de :

<i>Wolfgang</i>	<i>GERLACH</i>	<i>EDILON</i>
<i>Gérard</i>	<i>HERBAUX</i>	<i>Consultant</i>
<i>Jacques</i>	<i>NARDIN</i>	<i>Consultant</i>

Avant-propos

● Les arguments en faveur de la voie béton dans les tunnels ferroviaires sont très nombreux :

- amélioration des conditions d'intervention des secours;
- évacuation facilitée des usagers en cas d'accidents;
- amélioration de la pérennité de l'ouvrage;
- réduction des nuisances;
- augmentation du confort des passagers;
- opérations de maintenance et d'entretien plus rapides et plus simples;
- mise en conformité au gabarit européen sans retailler le tunnel;
- optimisation du gabarit en construction neuve;
- augmentation de la visibilité du fait de la clarté du béton;
- réduction de la consommation d'énergie électrique pour l'éclairage.

Tous ces avantages concourent à concevoir des tunnels ferroviaires intégrant pleinement le concept de développement durable.

Sommaire

1 - La nécessaire amélioration des conditions de sécurité	7
2 - Les tunnels ferroviaires, enjeux de société	7
3 - Les tunnels ferroviaires en France	8
4 - La pose de voies ferrées en Europe et dans le monde	9
5 - La voie fixe ou voie béton	11
5.1 - Principe de construction	11
5.2 - Principaux types de voies sans ballast	12
5.2.1 - Traverses en béton noyées dans la dalle en béton	12
5.2.2 - Expérimentation française d'une voie à attache directe	14
5.2.3 - ERS (Embedded Rails Systems) système de voie noyée sans attache dans la dalle en béton de type Edilon	16
5.3 - Les points forts de la voie béton	18
5.3.1 - Avantages financiers	18
5.3.2 - Avantages techniques	18
5.3.3 - Sécurité des usagers et intervention des secours	19
5.3.4 - Diminution du bruit	19
5.4 - Éléments préfabriqués en béton	20
5.5 - Voie expérimentale de la ligne TGV Est	21
5.6 - Comparaison technique voie béton - voie ballastée	23
5.7 - Approche économique	24
6 - L'évaluation des risques et l'amélioration de la sécurité en tunnels ferroviaires	24
6.1 - Les risques d'accident	24
6.2 - Les aspects opérationnels	25
6.3 - Les accès au tunnel	26
6.4 - La progression à l'intérieur du tunnel	26
6.5 - Les dispositions relatives à la sûreté	27

7 - Gestion des opérations de lutte contre l'incendie	27
7.1 - Engagement des moyens de secours	28
7.2 - Variables essentielles impactant la sécurité en tunnel	28
7.3 - Composantes opérationnelles	30
7.3.1 - Délai d'intervention	30
7.3.2 - Sauvetage des personnes	31
7.3.3 - Évacuation	31
7.3.4 - Préservation de l'environnement	31
7.3.5 - Propagation de l'incendie	31
7.3.6 - Contraintes opérationnelles	32
7.3.7 - Qualité du milieu	32
7.4 - Tableaux récapitulatifs des problématiques et des contraintes	32
8 - Conclusion	35



*Tunnel du Pragal (Portugal) d'une longueur de 2 km, mis en service en l'an 2000.
Ce système de voie béton procure un accès aisé aux véhicules de secours
et de maintenance.*

Photo : Edilon

Au cours de ces dernières années, plusieurs sociétés ferroviaires européennes se sont résolument engagées à moderniser leur réseau ferroviaire et à favoriser l'innovation technique tout en améliorant les conditions globales de sécurité. De nombreuses études, suivies de réalisations, montrent la fiabilité de ces techniques. De plus, la réduction des coûts est réelle et la sécurité globale des ouvrages est augmentée. Transposer ces techniques dans les tunnels pour améliorer la sécurité est ainsi devenu une réalité.

1 - La nécessaire amélioration des conditions de sécurité

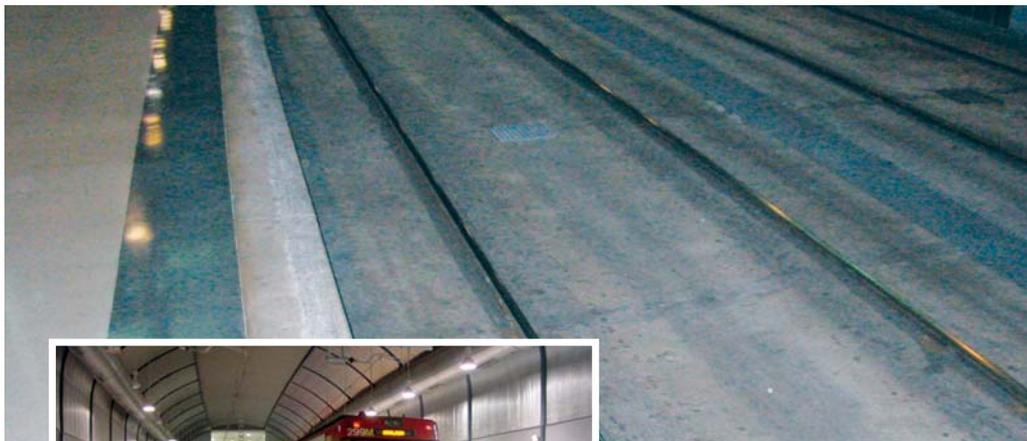
Comme les tunnels routiers, où depuis 1949 on a dénombré près de quarante incendies significatifs, les tunnels ferroviaires peuvent être aussi le siège de catastrophes et d'incendies sévères. Pour ces derniers, vingt-trois sinistres ont été recensés et analysés, dont six en France, parmi lesquels deux ont marqué les esprits, aussi bien par leur intensité que par les pertes en vies humaines ou les pertes d'exploitation.

Le premier a lieu en 1972, année où le Tunnel de Vierzy (Aisne) est le siège d'un très grave accident : suite à un éboulement, deux trains de voyageurs se percutent de front. On dénombrera plus de cent morts. Ce sinistre conduira la SNCF à accroître les investigations des tunnels, en vue de procéder à leur rénovation.

Le second accident a eu lieu en 1996 : le déraillement et l'incendie d'une navette de fret dans le tunnel sous la Manche causent d'importants désordres à la structure et à la voie de cet ouvrage, avec pour conséquence la fermeture du tunnel pendant deux ans. Par la suite, d'autres incendies ont mis en évidence la faiblesse des moyens de prévention et de secours pour procéder à l'évacuation des personnes. La difficulté à se déplacer sur le ballast est alors mise en exergue.

2 - Les tunnels ferroviaires, enjeux de société

Il s'agit, avant tout, d'une question de préservation de notre environnement et d'une volonté politique tant française qu'européenne. Le transport des marchandises et des produits dangereux ou combustibles qui les composent devrait, en effet, se faire par voie ferrée plutôt que par route. Le transfert d'une partie des marchandises de la route vers le rail, de part le développement du ferroutage, auquel il faut ajouter l'augmentation du trafic voyageurs, agit statistiquement sur les risques d'accidents, notamment dans les sections en tunnels. En conséquence, comme pour les tunnels routiers, les tunnels ferroviaires sont soumis aux mêmes risques d'accidents. La société civile, n'acceptant pas les conséquences



Les rails encastrés dans la dalle en béton permettent aux engins de secours de rouler sur la voie de la gare d'Alcobendas (banlieue de Madrid).

des catastrophes, les sociétés concessionnaires et les autorités administratives doivent mettre toutes les chances de leur côté, en donnant la meilleure sécurité possible aux ouvrages potentiellement dangereux.

3 - Les tunnels ferroviaires en France

Près de 1 532 tunnels représentant 640 km de voies ferrées ont été recensés en France, seuls 1 300 tunnels sont en exploitation. Il convient de noter que :

- 4 tunnels ont plus de 5 km de longueur ;
- 15 tunnels ont de plus de 3 km ;
- 27 tunnels ont de plus de 2 km ;
- 116 sont supérieurs à 1 km.

La construction de près de 50 % de ces tunnels date de la seconde moitié du XIX^e siècle. Ils comprennent pratiquement tous une pose des voies sur traverses et ballast. Si cette technique permet de respecter au mieux les contraintes géométriques du plan de roulement (profil en long et dévers), il convient de souligner

ses inconvénients incontournables, générés par la mise en œuvre elle-même :

- l'usure de la voie est inévitable, il convient alors de procéder à des rechargements ;
- les quantités de roches concassées utilisées pour la réalisation du ballast sont importantes et ces matériaux se raréfient ;
- la mise en œuvre génère du bruit et de la poussière ; des dispositions particulières doivent être prises pour respecter les conditions de travail ;
- le ballast s'use et doit être renouvelé ;
- les coûts d'entretien sont importants.



4 - La pose de voies ferrées en Europe et dans le monde

L'entretien du réseau est, pour tout concessionnaire, une nécessité vitale et une charge financière de première importance. En cas d'usure prématurée et/ou d'incidents, le trafic est détourné ou bien la vitesse est réduite, avec tous les retards et conséquences pour l'économie du gestionnaire, comme pour celle du client initial.

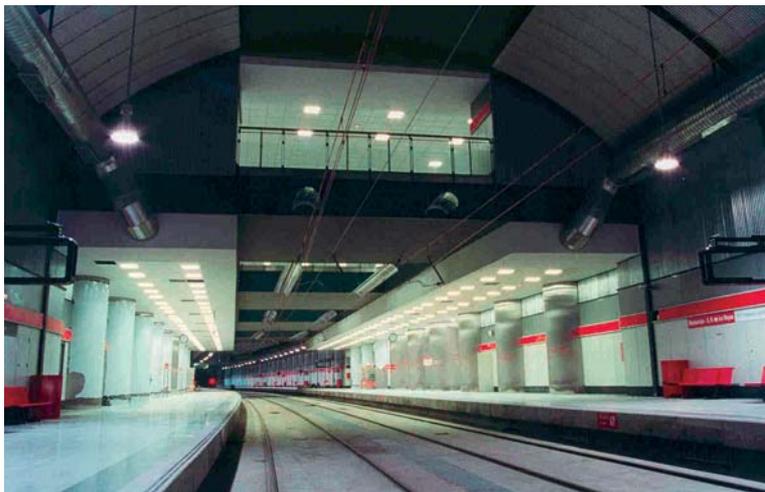
Il faut savoir qu'en Grande-Bretagne, le réseau ferré britannique est en crise à cause du coût trop élevé de la maintenance des voies ballastées. Or, chaque année les coûts de maintenance augmentent et maintenir le réseau en état est une bataille perdue d'avance. **En Europe, un virage semble toutefois pris avec la mise en service d'une voie béton ou voie directe sur le Channel.**

On peut estimer que c'est au début du xx^e siècle que sont apparues les premières poses de voies béton. Cette solution a été jugée intéressante dans les ouvrages souterrains.

C'est à la fin des années soixante, début des années soixante-dix, que sont proposées des solutions pour des liaisons grandes lignes au Japon. La voie béton sans ballast y est maintenant systématiquement retenue pour les nouvelles lignes.

En Allemagne, la première expérience date de 1972 : un tronçon de 740 m a été réalisé en gare de Rheda. C'est dans ce pays, que cette technique a suscité le plus d'intérêt. Depuis 1997, 145 km de voies béton ont été construites, dont plus de 30 % en tunnels.

*Tunnel de 7800 m,
station d'Alcobendas
en Espagne.*



En Europe, outre l'Allemagne, aux Pays-Bas, en Italie, en Espagne et au Portugal, la voie béton est de plus en plus utilisée, à l'air libre comme dans les tunnels ferroviaires. Il est, en effet, démontré que même si le coût d'installation de la voie « fixe » par rapport à la voie traditionnelle en ballast est plus élevé, les surcoûts sont rapidement amortis grâce à une diminution importante des coûts de maintenance et à une plus grande disponibilité de la voie.

La voie fixe en béton permet d'atteindre une vitesse de 300 km/h, dans des conditions économiques et avec un niveau de confort optimal pour l'utilisateur.

En Espagne, le Ministère de la Construction impose une voie béton dès que le tunnel dépasse 1 km de longueur.



*En Espagne, gare
d'Atocha à Madrid,
train à grande vitesse
sur voie béton.*

5 - La voie fixe ou voie béton

Plusieurs techniques existent actuellement, toutes utilisent une dalle en béton armé installée soit en continu grâce à une machine spécialisée (machine à coffrage glissant), soit en éléments préfabriqués, soit par la mise en œuvre de béton coulé en place. Ces techniques sont :

- le système spécialisé de traverses en béton noyées dans la dalle en béton ;
- l'attache directe de la voie sur « selles » ;
- le rail noyé ou « Embedded Rail System » (ERS) : les rails sont maintenus dans des gorges moulées dans le béton par l'intermédiaire d'une résine souple.

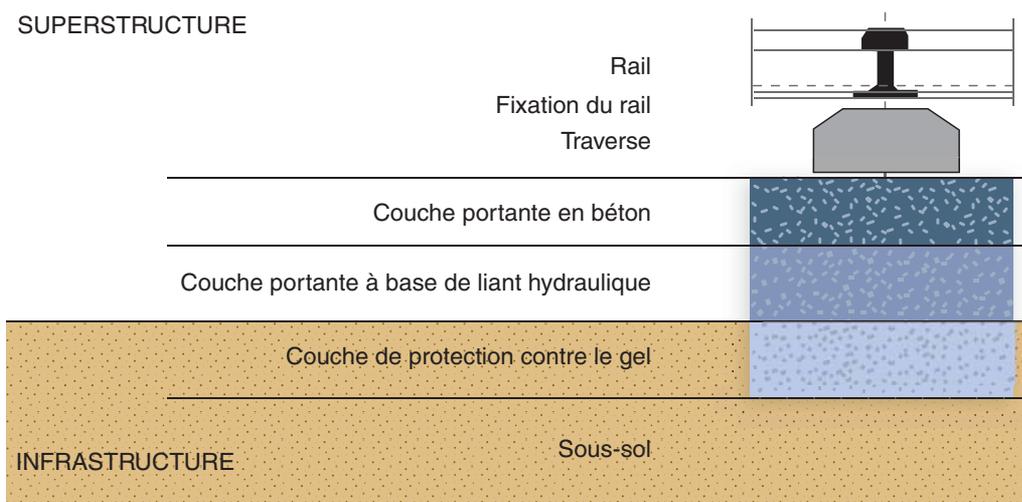
■ 5.1 - Principes de construction de la voie béton

Dans les poses de voies classiques, les traverses reposent sur la plate-forme par l'intermédiaire du ballast dont le rôle est de :

- répartir les efforts transmis ;
- donner à la voie une élasticité suffisante pour supporter les efforts statiques et dynamiques ;
- assurer une limitation des déplacements transversaux.

La voie béton est une superstructure pour laquelle le ballast, susceptible de se tasser, est remplacé par des couches d'assise constituées de dalles en béton.

Ce type de voie doit assurer les mêmes fonctions que la voie traditionnelle par la superposition de différents étages de raideurs décroissantes.



L'élasticité et l'amortissement nécessaires – absents de la couche d'assise très résistante – sont assurés par la fixation du rail ou par un matériau élastique sous les traverses. L'avantage sur le ballast est que l'élasticité est ici parfaitement contrôlée et se dégrade beaucoup moins sous l'effet des sollicitations dynamiques.

À partir de ces principes, différentes solutions techniques existent, elles peuvent être classées de la façon suivante :

- fixations ponctuelles (avec ou sans traverse) ;
- pose continue (rail enrobé ou inséré).

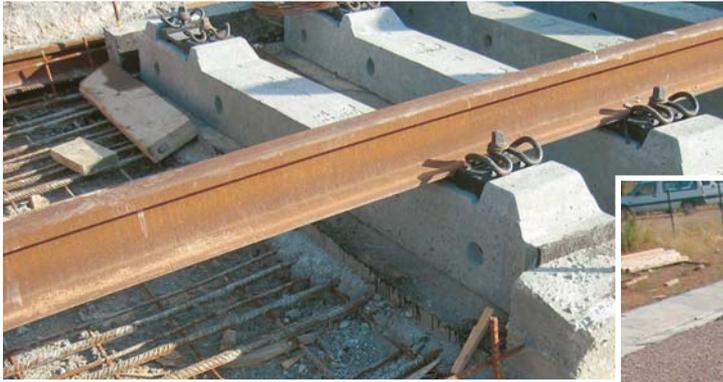
■ 5.2 - Principaux types de voies sans ballast

5.2.1 - Traverses en béton noyées dans la dalle en béton

Les traverses peuvent être maintenues en place de plusieurs façons : la plus courante est l'utilisation de ballast. Si cette méthode est très avantageuse à la construction, elle nécessite cependant une hauteur totale de voie importante et beaucoup d'entretien.

Une autre technique existe, consistant à noyer la traverse dans un béton de calage. La pose est facilement réalisable et nécessite peu de maintenance. Les traverses sont équipées d'inserts qui permettent la mise à la hauteur de la voie, avant le coulage du béton. Les techniques de béton pompé trouvent en tunnel un emploi, optimal. Les photographies de la page suivante montrent les différentes étapes de la construction d'une voie.

Si ce type de voie peut être utilisé en tunnels ferroviaires, l'accès des moyens d'entretien, et notamment des véhicules de type routier, est toutefois limité. La hauteur de construction est proche de celle d'une voie ballastée, ce qui limite l'accès de véhicules routiers pour les opérations d'entretien, **mais favorise, en revanche, les conditions de cheminement des personnels ou l'évacuation des usagers en cas d'incidents ou d'accidents.**



1



2

3

Les différentes étapes de la construction de la voie :

- 1 pose des traverses en béton sur la chape en béton ;
- 2 disposition d'armatures intermédiaires ;
- 3 positionnement des rails (selles, boulons, ressorts) ;
- 4 installation des bordures latérales (auget) ;
- 5 constitution de la dalle définitive.



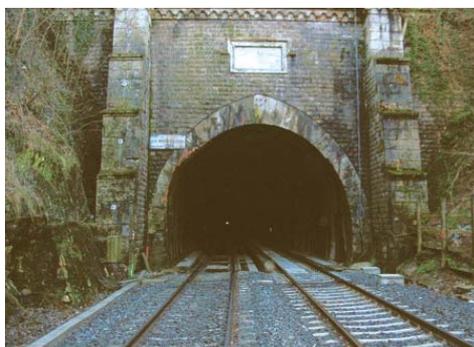
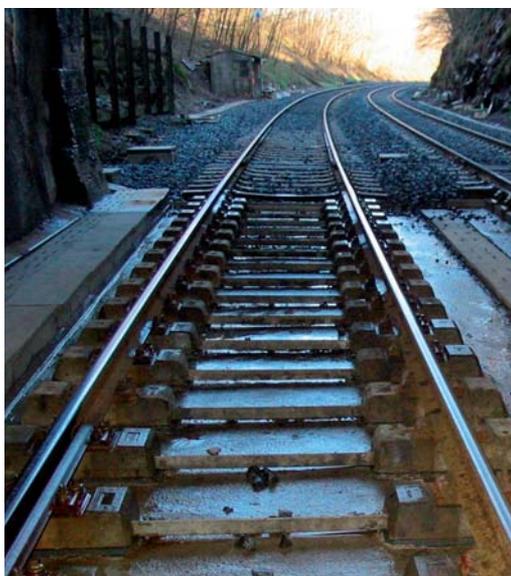
4

5



5.2.2 - Expérimentation française d'une voie à attache directe

Les travaux de pose d'une voie ferrée à attache directe sur dalle mince en béton armé ont été réalisés dans le tunnel ferroviaire situé de Moret à Lyon, à l'ouest de la gare de Saint-Martin d'Estréaux, dans le département de la Loire. Le tunnel non électrifié, à doubles voies, d'une longueur de 1 382 m, a fait l'objet de travaux de réhabilitation et de rénovation en 2003.



La mise en œuvre d'une épaisseur importante de ballast et l'encombrement de l'assainissement conduisaient à réaliser, en terrain rocheux, des travaux de terrassements importants. Pour s'affranchir de ces travaux de déroctage lourds et coûteux, le maître d'ouvrage a retenu une solution technique permettant d'optimiser l'encombrement vertical de la voie et de sa structure d'assise, par la réalisation d'une dalle mince en béton, associée à une pose de voie directe sur selles. Cette solution permet de réserver les possibilités d'évolution ultérieures en matière des gabarits GB et d'électrification. Innovante pour la France, cette technique ouvre les perspectives de pérenniser le débouché et le dégagement des gabarits et de réduire les interventions d'entretien des voies.

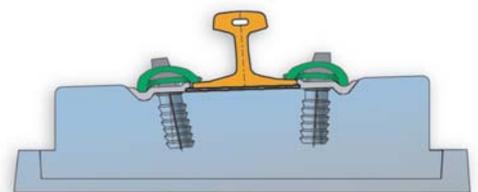
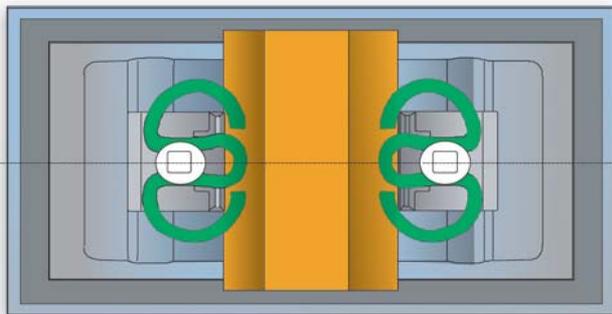
Tunnel sous
La Manche
(cross over).



La surface de la dalle mince en béton armé est réglée avec une tolérance de l'ordre du centimètre. Les rails sont fixés sur des selles élastiques. Celles-ci sont réglées puis scellées dans le béton, permettant d'obtenir le niveau exact du plan de roulement des rails, conformément aux tolérances prescrites par la SNCF. Cette pose permet d'envisager une augmentation future de la vitesse des trains. Elle facilite son entretien par l'emploi de matériels mécanisés et informatisés.



Aujourd'hui, les coûts d'entretien des voies et les renouvellements des traverses et du ballast sont conséquents. De plus, ces travaux nécessitent d'importants tonnages en matériaux (granulats) et leur mise en œuvre nécessite des précautions en raison de l'espace confiné (dégauchement de poussières, etc.).



Le rail est fixé par l'intermédiaire d'une selle en acier ou en béton de résine scellée dans la dalle en béton armé. Le principal avantage est la faible hauteur du complexe dalle-support de voie.

5.2.3 - Le rail noyé ou ERS (Embedded Rails Systems)

Il s'agit d'un système de fixation en continu : les rails sont maintenus dans une engravure qui peut être moulée dans une dalle en béton. La caractéristique principale du système ERS est l'absence totale des éléments de fixation traditionnelle, tels que les plaques, les boulons, les selles, les ressorts, etc.

Après réglage et calage, le rail est enrobé et collé par une résine bi-composante, dont les capacités mécaniques sont fonction des besoins du projet (atténuation de bruit ou des vibrations). Cette résine doit rester invariable dans le temps et résister au rayonnement et aux agressions chimiques, thermiques et mécaniques. De plus, elle doit être facile à employer dans des conditions courantes de chantier :

- conditionnement adapté des composants ;
- consistance et temps de polymérisation réglés en fonction du travail à réaliser ;
- collage parfait sur toutes les surfaces ;
- insensibilité à l'humidité.

Principaux points forts du système ERS :

- réduction des bruits et des vibrations ;
- augmentation de la durée de vie des rails grâce au support vertical et au calage latéral en continu par la résine élastique et par l'absence de forces dynamiques induites par la flexion des traverses ;
- réduction de la hauteur de la construction (tunnels, ouvrages d'art, gares) ;
- technique utilisable pour toute la gamme des rails existants ;
- soudage et meulage des rails sans contraintes en dehors de la réservation ;
- réglages avec outillage courant ;
- entretien réduit au minimum : plus de fluage des patins, plus de pièces desserrées ou corrodées ;
- remplacement aisé du rail.



La dalle en béton de la ligne de métro n° 8, à Madrid, présente un évidement permettant la sauvegarde des personnes tombées sur la voie et facilitant le nettoyage.

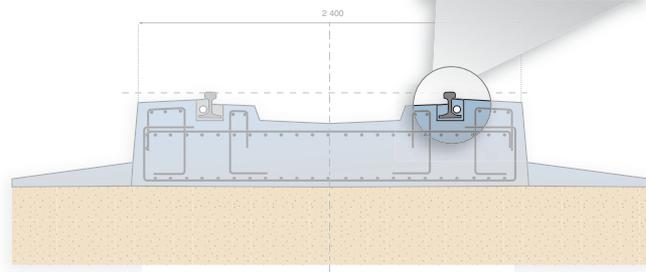
Mise en œuvre du système ERS



Le béton est réglé devant la machine à l'aide d'une pelle hydraulique. La plateforme après passage de la machine à coffrage glissant (slip-form).



Vue en coupe d'une dalle en béton pour une voie à grande vitesse.



Mise en place de la résine de fixation du rail dans la réservation de la dalle en béton.

■ 5.3 - Les points forts de la voie béton

5.3.1 - Avantages financiers

Ils sont perceptibles aussi bien dans le coût de construction que sur les dépenses d'entretien.

• Coût de construction :

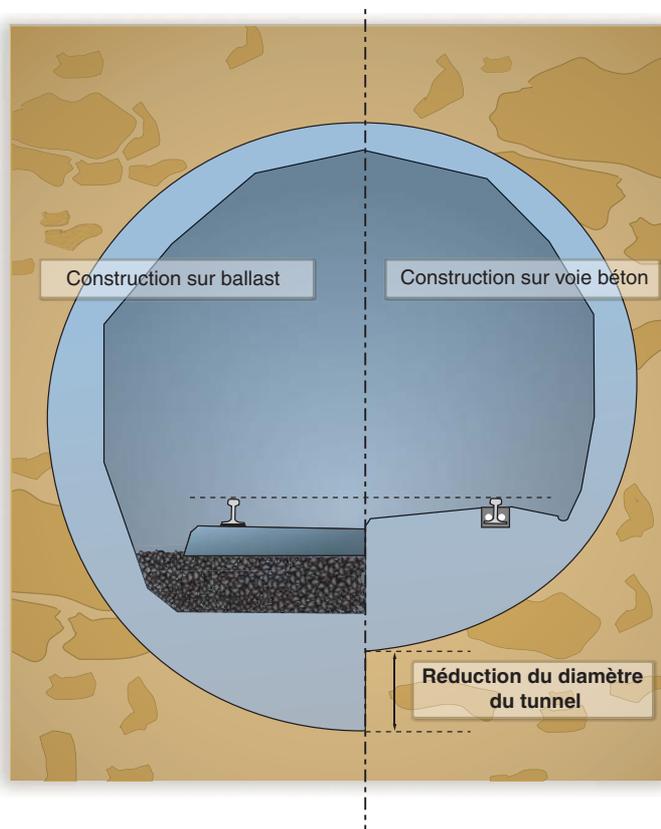
- réduction du coût de la réalisation par la possibilité d'augmenter le gabarit du tunnel (lors des travaux de rénovation) ou de diminuer le diamètre du tunnel (surface bétonnée, excavations) en travaux neufs ;
- réduction du temps de pose des rails (le réglage et le coulage sont plus simples que dans le cas des fixations classiques) – en tenant compte de l'ensemble des paramètres, la pose en rail noyé est comparable aux systèmes existants.

• Dépenses pour l'entretien :

- entretien pratiquement nul pour le rail (plus de réglages ou de boulons à resserrer) ;
- accès facile pour les véhicules sur pneus (inspection et entretien de l'équipement du tunnel) ;
- réparations ponctuelles sur les rails facilitées (remplacement des rails cassés, rechargement des rails usés) ;
- dans le cas d'accident grave (choc, déraillement ou feu) s'il est nécessaire de remplacer des longueurs importantes, le support n'ayant pas bougé, les réglages et la pose seront bien moins chers qu'avec des fixations classiques.

5.3.2 - Avantages techniques :

- le rail est naturellement isolé électriquement ;
- le collage continu donne des valeurs négligeables de dilatation même sur des grandes longueurs ;
- la durée de vie des rails est augmentée par le support en continu, grâce à la disparition de l'effet ondulatoire (usure excessive du rail sur les traverses) et des efforts de fatigue.



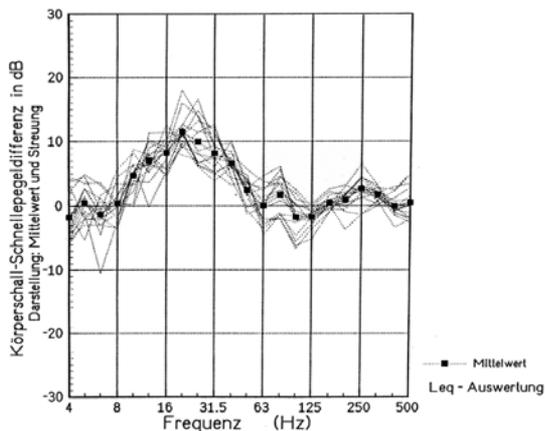


5.3.3 - Sécurité des usagers et intervention des secours :

- le support (dalle en béton) est incombustible ;
- l'accès aux véhicules routiers des premiers secours est possible sans dispositifs supplémentaires ;
- l'évacuation des passagers n'est pas gênée par les rails, les traverses ou tous les autres dispositifs de fixation.

5.3.4 - Diminution du bruit

Le bruit est un élément de confort incontournable. Le système ERS permet la diminution du bruit solide grâce à sa rigidité et à l'absence totale de ponts acoustiques entre rail et support. Le bruit aérien est également diminué par l'encapsulation du rail (effet de « silentbloc »).



Nota

La flexibilité du produit de fixation des rails peut être adaptée selon les valeurs absorbantes recherchées.

Mesures comparatives entre une voie ballastée et une voie noyée dans la gamme des fréquences 25 – 31,5 Hz, le système ERS réduit de 10 dB (A) le bruit de roulement.

Nota

Le système ERS a été installé dans de nombreux pays depuis 1982 et notamment dans le métro de Londres, le tunnel sous la Manche, les tunnels Lantau à Hong Kong, Pragal au Portugal, Alcobendas en Espagne, Gothenbourg en Suède, Zaragoza en Espagne, Pijnacker, Den Haag, Utrecht et Goolboog aux Pays-Bas.

■ 5.4 - *Éléments préfabriqués en béton : rapidité de mise en place*

La fabrication en usine de plaques d'appui ou de dalles préfabriquées pour voie ferrée est une alternative à la constitution d'une dalle coulée en place. Les premières applications ont été réalisées aux Pays-Bas, il y a plus de 30 ans.

La préfabrication en usine d'éléments de dimensions importantes (de 2 à 8 m de long pour 2,60 m de large et 20 cm d'épaisseur) permet des tolérances de fabrication de l'ordre de 0,1 mm.

Les éléments peuvent être soit en béton armé ou précontraint, de résistance C 55, conforme à la norme NF EN 206-1. Les armatures permettent la répartition des sollicitations et charges. Les dalles ainsi réalisées peuvent recevoir tous les systèmes, qu'ils soient ERS ou classiques ; les fixations de rails sont pré-installées.



Pose de dalles préfabriquées à Lausanne de 4 m de longueur. Les dalles sont alignées puis le jointement est effectué grâce à un mélange de mortier de ciment.

Le transport des plaques est effectué par un engin classique de transport; sur place, un engin de levage à portique, utilisable à l'air libre comme en tunnel, permet le bon positionnement de chaque plaque préalablement numérotée conformément à la géométrie de la voie.

La pose des éléments est effectuée sur une couche portante à base de ciment de 20 à 30 cm d'épaisseur. Les plaques sont ajustées sur chantier grâce à des éléments de calage. Les plaques sont ensuite liées entre elles par un mortier de scellement.



Platelage PVF sur bibloc. Les éléments préfabriqués, utilisés dans les passages à niveau, peuvent être employés également dans les tunnels.

■ 5.5 - Voie expérimentale de la ligne TGV Est

Suite aux problèmes d'exploitation des voies à grande vitesse ballastées par RFF, il a été décidé de réaliser une voie expérimentale sur le tracé de la LGV-Est. Cette voie se trouve au nord de MONTYON (77), sur la commune de Chauconin.



Le projet représente deux voies de 1 800 ml chacune, incluant un appareil de voie permettant le passage d'une voie sur l'autre. La section est décomposée en deux, la moitié en courbe avec des dévers accusant jusqu'à 10 %, le reste étant en alignement droit.

Les dalles, qui reposent sur une grave ciment d'épaisseur variable, sont fortement ferrillées, environ 150 kg/m³.

L'objectif est de faire circuler les TGV à 320 km et de suivre l'évolution et le comportement de la voie en béton.

Des barbacanes sont disposées tous les 5 m afin de pouvoir évacuer les eaux interstitielles qui pourraient être mises en pression lors du passage des trains. Une étanchéité recouvre toute la dalle avant mise en place des traverses et du béton de blocage.

Les contraintes de réalisation

Elles proviennent principalement du mode d'approvisionnement du béton. Les voies LGV se trouvent en campagne avec des accès difficiles. Le fait d'avoir choisi de réaliser les voies en conservant le passage des trains travaux a accentué les difficultés de réalisation et ralenti considérablement la vitesse d'avancement. Sans contrainte, une cadence minimum de 500 m/j est tout à fait réalisable.

Pour réaliser le chantier, le béton a été approvisionné par train au niveau de la machine.

Formulation du béton

Le béton de voie utilisé est un C35/47 dosé à 370 kg/m³ de CEM III en granulométrie 0/20 + entraîneur d'air + plastifiant, plasticité de mise en œuvre S1.

■ 5.6 - Comparaison technique voie sans ballast – voie ballastée

	Voie avec ballast		Voie béton	
	Avantages	Inconvénients	Avantages	Inconvénients
Conception	<ul style="list-style-type: none"> • Tenue de la géométrie de voie apte à l'usage • Niveau sonore faible 	<ul style="list-style-type: none"> • Projections de ballast à grande vitesse • Irrégularité des propriétés rhéologiques • Résistance latérale au déplacement limitée • Transfert des vibrations élevé 	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction de la hauteur de la structure • Régularité des propriétés rhéologiques • Pas de défragmentation de ballast • Haute résistance aux déplacements latéraux et longitudinaux 	<ul style="list-style-type: none"> • Émissions sonores – bien que plus élevées – plus facile à traiter
Construction	<ul style="list-style-type: none"> • Maîtrisée à grande vitesse • Largement mécanisée • Faible sensibilité aux imperfections de fabrication • Prix maîtrisé 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation de quantités importantes de granulats 	<ul style="list-style-type: none"> • Cadences rapides (en fonction de l'approvisionnement en béton) • Expériences étrangères favorables • Maîtrise globale des cadences et des coûts 	<ul style="list-style-type: none"> • Expérience française réduite sur le contrôle et la surveillance de ce type de voies • Transition voie béton / voie ballastée demandant une réalisation rigoureuse
Maintenance	<ul style="list-style-type: none"> • Techniques de maintenance parfaitement maîtrisées 	<ul style="list-style-type: none"> • Dégradation du ballast • Évolution à long terme de la géométrie de voie • Obligation d'un suivi des opérations de contrôle 	<ul style="list-style-type: none"> • Grande durabilité générale de la voie béton sans action de reprise ou de nivellement 	<ul style="list-style-type: none"> • Expérience française faible vis-à-vis de la maintenance des rails

■ 5.7 - Approche économique

Le point de vue économique est primordial dans le choix d'une pose de voie béton (sans ballast). Une vision globale intégrant à la fois les coûts de construction et les coûts d'exploitation s'impose. Si l'enveloppe finale élevée a été un frein au développement de cette technique, aujourd'hui, la prise en compte, d'une part, des coûts globaux et, d'autre part, des critères de développement durable, permet de relativiser cette affirmation.

La pose de voie béton est particulièrement intéressante pour les tunnels ferroviaires ainsi d'ailleurs que sur les ponts.

Les opérateurs japonais ont la meilleure expertise de ces opérations. Les coûts de construction des voies sur dalle en béton au Japon sont de l'ordre de 1,3 à 1,5 fois ceux des voies classiques.

Sur les ponts et viaducs, l'avantage des voies sur dalles est plus net grâce au gain de poids mort sur les infrastructures. La voie sur dalle béton permet un maintien de l'état des voies plus long que la voie classique. Il n'existe aucun phénomène de défragmentation du ballast. Ce facteur s'intègre dans les coûts de maintenance qui sont d'un rapport 4 en faveur de la voie béton.

En conclusion, et selon l'expérience japonaise, l'excédent d'investissement de la voie béton est amorti entre deux et six années d'exploitation. Il convient de souligner que l'expérience allemande dans ce domaine conduit à des conclusions similaires.

6 - L'évaluation des risques et l'amélioration de la sécurité

■ 6.1 - Les risques d'accident

Les accidents en tunnels se traduisent par les mêmes effets que ceux ayant lieu à l'air libre. Sans être exhaustif, on peut citer les points suivants.

- **Les déraillements d'un convoi**: plusieurs centaines de voyageurs peuvent être impliquées. Il s'agit alors, pour les services de secours, de procéder à l'évacuation de nombreuses personnes, suivant le type de train (métro, RER, TER ou TGV). Le risque d'un incendie est alors toujours possible. Quand des marchandises sont en cause, la solution retenue pour les secours sera fonction de la dangerosité des marchandises transportées.



Tunnel de Pragal (voie d'accès pompiers en béton), on distingue le poteau d'incendie pour l'alimentation de la colonne sèche.

- **Les collisions frontales ou lors de croisements de trains :** des opérations de désincarcération des passagers et le traitement éventuel d'incendies sont à mener. Dans ces opérations, et compte tenu de la configuration des lieux, les secours doivent intervenir dans des conditions défavorables (éclairage réduit, étroitesse et espace confiné, gaz toxiques, vapeurs, etc.).

- **Les incendies** sont les risques les plus graves pour les tunnels ferroviaires et les métros. Selon les situations (incendie de train de voyageurs, transport de matières dangereuses ou de marchandises, etc.), les paramètres concernent le développement des fumées, les températures, la destruction des équipements, les victimes et leur évacuation, la durée de l'opération, les moyens à mettre en œuvre, la pénibilité de l'opération.

Le lecteur pourra utilement se référer à la revue *Le Sapeur-pompier magazine* « Accidents ferroviaires en milieu ouvert et fermé » paru en septembre 2004. Les articles reprennent les travaux du groupe de travail « Sécurité dans les tunnels » de la FNSPF (Fédération nationale des Sapeurs-pompiers de France).

■ 6.2 - Les aspects opérationnels

Les difficultés pour traiter ces accidents sont liées aux contraintes d'approche des secours. Il convient de réduire les délais d'intervention et d'évacuation afin de permettre aux voyageurs de pouvoir échapper aux dangers des fumées et aux secours d'arriver au plus près du sinistre. La rapidité sans transfert de charge est primordiale.

■ 6.3 - Les accès au tunnel

Les moyens de secours doivent pouvoir intervenir dans les délais les plus courts à l'une ou l'autre des têtes de tunnel. La construction de chemins d'accès réservés aux véhicules et engins spéciaux des pompiers et secouristes est nécessaire. L'implantation de la plupart des tunnels se situant en zone montagneuse, avec des pentes à fort pourcentage, les pistes doivent être utilisables par tous temps. Le traitement des chemins d'accès par stabilisation au ciment est souvent une bonne solution.

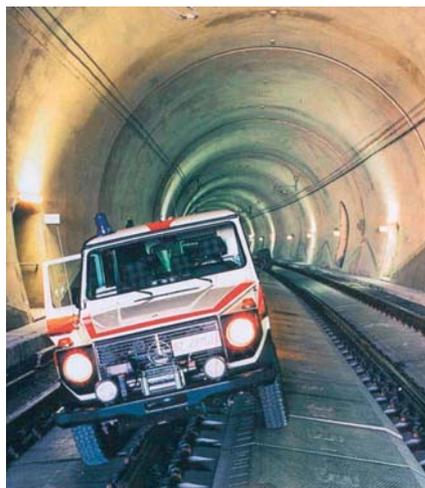
La réalisation d'une route stabilisée (la route en béton est une solution durable) accompagnée d'une aire permettant l'accueil des secours, la mise en place d'un poste de commandement et éventuellement d'une zone de « posée hélicoptère » est nécessaire.

■ 6.4 - La progression à l'intérieur du tunnel

Les matériels de secours du type bran-cards, tuyaux, pompes, etc., approvisionnés par les pompiers ou stockés aux têtes du tunnel, doivent pouvoir être transportés à l'intérieur, au plus près de l'endroit du sinistre. Des solutions de transport par lorries obligent à des reprises de matériels conduisant à des pertes de temps supplémentaires et des capacités de volumes transportés très réduites.

Les véhicules rails-routes qui pourraient équiper les pompiers n'apportent qu'une capacité ponctuelle et ne permettent pas une évacuation rapide et importante des blessés et passagers notamment dans les tunnels de grandes longueurs.

Les solutions suisse ou allemande du train de secours ne sont pas en usage en France.



DR Magazine Le Sapeur-pompier



DR Magazine Le Sapeur-pompier

■ 6.5 - Les dispositions relatives à la sûreté

Les voies ferrées sont, comme on a pu le vérifier récemment, très sensibles aux malveillances. La voie béton, de part la simplicité de ses formes, constitue une parade dissuasive contre ces actions.

7 - Gestion des opérations de lutte contre l'incendie en tunnel ferroviaire par les secours extérieurs (sapeurs-pompiers)

D'une manière générale, la mission des sapeurs-pompiers consiste à intervenir, par ordre de priorité, sur :

- les personnes ;
- les biens ;
- l'environnement.

Bien que chaque intervention soit spécifique, les opérations de lutte doivent répondre à une méthode d'engagement des secours rationnelle et répondant à l'objectif initial (missions générales).

S'agissant des tunnels tant routiers que ferroviaires, les secours doivent faire face à des incendies pouvant être particulièrement violents et difficiles à combattre. L'anticipation et la planification de l'engagement des secours impliquent la définition d'une conception tactique préalable à tout engagement des personnels et des moyens avec pour but certes d'assurer la mission générale mais aussi de préserver les personnels d'intervention.

Des principes généraux s'appliquent et doivent permettre :

- d'investir au plus vite le tunnel par ses accès (avec les moyens opérationnels utiles) ;
- de sauver les usagers et d'éteindre les foyers ;
- de reconnaître les lieux ;
- de mener les opérations de commandement ;
- de maîtriser les dispositifs techniques de sécurité et de gestion du tunnel.

Pour atteindre cet objectif, l'application d'une doctrine d'intervention s'impose. Il convient d'avoir des schémas préétablis d'engagement des secours tant en engins de secours spécifiques qu'en personnel. Leur mission sera alors fixée avant leur engagement par le poste de commandement avancé disposé au plus près du sinistre. Un Poste de commandement principal à l'extérieur du tunnel assure la coordination générale.

■ 7.1 - *Engagement des moyens de secours*

Pour permettre un engagement des moyens rapide et sûr, assurer les reconnaissances et les sauvetages éventuels, il est nécessaire de pouvoir arriver rapidement et en sécurité au plus près du foyer.

Se pose alors la praticabilité du cheminement. L'expérience montre que la voirie peut être difficilement praticable du fait :

- des fumées denses qui peuvent occuper la totalité de la section (gaz toxiques pour les personnels et pour les véhicules) ;
- des obstacles rencontrés (voitures en travers, objets ou éléments ayant chuté, etc.) ;
- de la qualité de la chaussée ou de la voie.

Plus les cheminements et les accès seront praticables, plus l'auto-évacuation des usagers et leur sauvetage seront faciles et la mise en œuvre des moyens d'extinction rapide.

■ 7.2 - *Variables essentielles impactant la sécurité en tunnel*

Pour le cas particulier des tunnels, il est quelques éléments à connaître. Quatre variables sont à prendre en compte :

- le contenant ;
- le contenu ;
- les usagers ;
- l'action des secours.

Le contenant présente des caractéristiques fixes connues et figées.

Le contenu est variable.

Il concerne les véhicules et leur contenu.

Quatre grandes familles de véhicules sont recensées :

- les voitures légères ;
- les poids lourds conventionnels ;
- les autocars ;
- les transports de liquides inflammables.

Deux grandes familles de sinistres sont possibles :

- incendies spontanés résultant d'un dysfonctionnement technique ;
- incendies résultant d'un accident de la circulation.

La conjonction de ces deux familles permet de définir des scénarios d'intervention et/ou de mise en situation qui peuvent être ou ne pas être traités par les secours.

Organisation de l'accès des secours dans le métro de Madrid



À la station d'Alcobendas (métro de Madrid), un ascenseur permet la descente des véhicules de secours ou de maintenance, directement sur la voie en béton ERS.



Scénario d'intervention selon les quatre grandes familles de véhicules et les deux grandes familles de sinistres			
	Puissance de l'incendie	Volume de fumées produites	Temps de montée de puissance
Voitures légères	2 à 6 MW	20 à 40 m ³ /s	
• Dysfonctionnement technique	Extinction facile		15 à 30 minutes
• Accidents de la circulation	Extinction facile		< 15 minutes
Poids lourds conventionnels	50 à 100 MW	40 à 90 m ³ /s	
• Dysfonctionnement technique	Extinction possible		< 10 minutes
• Accidents de la circulation	Extinction difficile		Très rapide
Autocars	50 à 100 MW	60 à 90 m ³ /s	
• Dysfonctionnement technique	Extinction difficile		< 10 minutes
• Accidents de la circulation	Extinction très difficile		Très rapide
Transports de liquides inflammables	De 100 à 300 MW	90 à 300 m ³ /s	
• Dysfonctionnement technique	Extinction très difficile à impossible		< 10 minutes
• Accidents de la circulation	Extinction impossible		Immédiat

■ 7.3 - Composantes opérationnelles

Dans tous ces cas les secours devront faire face à des situations qui font intervenir les paramètres suivants: délai d'intervention, sauvetage des personnes, évacuation, préservation des biens, propagation de l'incendie, contraintes opérationnelles et milieu.

7.3.1 - Délai d'intervention

Il s'agit en fait du délai d'arrivée des secours sur les lieux. Ce délai comprend :

- le délai de réaction de l'exploitant (le cas échéant) ;
- la prise d'appel ;
- son interprétation ;
- l'alarme du ou des centre(s) de secours concerné(s) ;
- le délai de départ des secours ;
- le délai de route.

À titre d'exemple concret, en 7 minutes, les secours n'auront parcouru tout au plus que 3 ou 4 km, compte tenu de tout ce qui précède.



DR : soldats-du-feu.com

Pendant tout ce temps, l'incendie se développe librement. Tout va très vite. Lors du récent incendie dans le tunnel du Fréjus, en juin 2005, 700 mètres du tunnel, présentant une section de 50 m², ont été totalement envahis par la fumée et les gaz de combustion en 7 minutes. Cet exemple explique la difficulté pour les secours de ne pouvoir effectuer tous les sauvetages des usagers en cours d'évacuation.

7.3.2 - Sauvetage des personnes

Le sauvetage concerne les personnes valides autant que celles à mobilité réduite (et pas seulement en fauteuil roulant mais aussi les enfants et les personnes âgées), ou encore nécessitant une désincarcération.

Compte tenu des délais d'intervention, il est évident que le sauvetage ne peut être complet.

L'auto-évaluation des usagers vers des espaces sécurisés est impérative.

Se pose alors la nécessité d'intégrer le comportement humain des personnes en situation d'incendie dans un environnement fermé comme les tunnels.

7.3.3 - Évacuation

L'évacuation devrait se dérouler en trois phases :

- auto-évaluation vers un sas ou un espace sécurisé ;
- prise en compte de la présence d'usagers par l'exploitant ;
- évacuation assistée par les secours vers l'une des deux têtes.

7.3.4 - Préservation de l'environnement

Il s'agit de limiter, autant que faire se peut, les dégâts à l'infrastructure, dans le but de pouvoir remettre l'ouvrage en service le plus rapidement possible.

Le résultat final dépend aussi de la qualité intrinsèque de ladite infrastructure avant le sinistre.

7.3.5 - Propagation de l'incendie

La propagation de l'incendie s'effectue de véhicule à véhicule et/ou de véhicule vers l'environnement du tunnel (matériaux combustibles, câbles, chaussée, etc.) Les puissances et surtout les pouvoirs fumigènes développés font que l'incendie va générer une forte quantité de fumées imbrûlées à haute température. En parcourant le tunnel, cette fumée va retrouver de l'air frais, donc de l'oxygène. Ces fumées vont alors se ré-enflammer spontanément et enflammer d'autres véhicules ou tout autre matériau combustible qu'elles trouveront sur leur passage, quelquefois sur des distances très importantes (exemple: 300 m au tunnel du Mont-Blanc). Cela produit une réaction en chaîne, tant que du combustible est présent de loin en loin (phénomène dit de flash-over en continu). Ceci explique alors pourquoi les sapeurs-pompiers parlent « d'impossible opérationnel ».

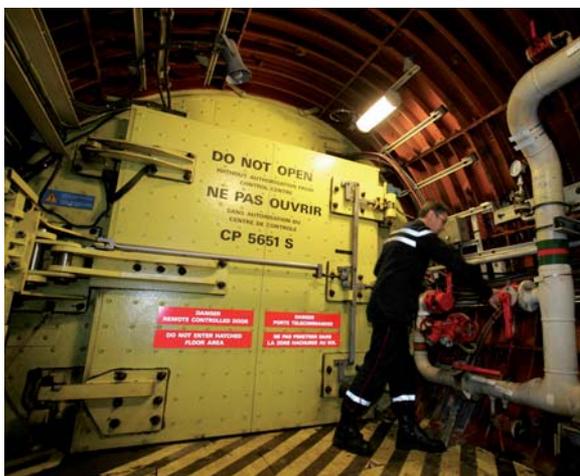
7.3.6 - Contraintes opérationnelles

Les sapeurs-pompiers doivent prendre en compte les critères suivants : les fumées opaques et toxiques, la chaleur et le rayonnement.

Ces contraintes découlent directement de la propagation de l'incendie, sachant aussi que les fumées épaisses et chargées de suie (résultant de la combustion des carburants, des pneumatiques, de certains chargements, etc.) vont représenter autant de difficultés pour les secours (chaleur intense, visibilité nulle, caméras thermiques opérationnelles comme réseau de vidéo-surveillance inopérants, etc.).

7.3.7 - Qualité du milieu

La conception d'un tunnel caractérise son type: ouvert, fermé, combustible, facilitant la propagation. Dans un sinistre en milieu ouvert, le flux de chaleur et les fumées peuvent s'élever librement dans un environnement « infini ». Il en est tout autrement en tunnel (milieu fermé) puisque les contraintes géométriques de l'ouvrage font que la seule échappatoire est, dans bien des cas, le tunnel lui-même! Cela suffit à expliquer les phénomènes de flash-over en continu.



DR : soldats-du-feu.com

■ 7.4 - Tableaux récapitulatifs des problématiques et des contraintes

Tableau récapitulatif de l'intégration des problématiques et des contraintes								
	Voitures légères		Poids lourds conventionnels		Autocars		Transports de liquides inflammables	
	DT	AC	DT	AC	DT	AC	DT	AC
Délais d'intervention	0	+	+	+++	+++	+++	+++	IO
Sauvetage des personnes :								
– assistance simple	+	+++	+	+++	+++	+++	+++	IO
– mobilité réduite	+++	IO	(1)	+++ à IO	+++	IO	IO	IO
– avec désincarcération	IO	IO	IO	IO	IO	IO	IO	IO
Évacuation des personnes	+	+	+	+	+?	+++	IO	IO
Préservation du tunnel	0	0	+	+++	+	+++	++++	++++
Propagation de l'incendie								
– à d'autres véhicules	0	+	+++	+++	+	+++	++++	++++
– à la structure	0	0	+	+++	+	+++	++++	++++
Dissymétrie	0	0	+++	+++	+++	+++	++++	IO
Fumées	0	0	+++	+++	+++	+++	++++	++++
Chaleur	0	0	0	+	0	+	+++	++++
Longueur des tunnels	+	+	+++	+++	++++	++++	IO	IO

Facteurs favorisant les situations rencontrées :

1. Dimensions des tunnels
2. Existence d'une autre galerie
3. Choix des matériaux
4. Systèmes d'extinction automatiques
5. Services d'incendie et de secours (publics, privés)
6. Qualité des données disponibles
7. Comportement des usagers
8. État physique des usagers

1. Potentiellement, excessivement variable, en fonction des circonstances.

IO : impossible opérationnel

0 : joue un rôle secondaire dans la réussite de l'intervention

+ à +++ : niveau de la contrainte

DT : Dysfonctionnement technique

AC : Accident

Tableau de synthèse des facteurs favorisant les situations rencontrées								
	Voitures légères		Poids lourds conventionnels		Autocars		Transports de liquides inflammables	
	DT	AC	DT	AC	DT	AC	DT	AC
Dimension des tunnels	0	0	+++	+++	++++	++++	IO	IO
Existence d'une autre galerie	+	+	+	+	+++	+++	++++	++++
Choix des matériaux	+	+	+++	+++	+++	+++	?	?
Extinction automatique	+	+	+++	++++	+++	++++	?	?
Services d'incendie et de secours	+	+	+++	++++	+++	++++	IO	IO
Qualité des données disponibles	+++	+++	+++	+++	++++	++++	++++	++++
Comportement des usagers	+	+	+	+	++++	++++	+	+
État physique des usagers	+++	+++	+++	+++	++++	++++		

DT : dysfonctionnement technique

AC : Accident



DR : soldats-du-feu.com

8 - Conclusion

***La pose de voie sur dalle en béton armé,
une solution pour améliorer la sécurité et la sûreté.***

La nécessité pour les pompiers d'avoir accès à l'intérieur du tunnel dans les délais les plus rapides, conduit à envisager la mise en œuvre de solutions techniques leur permettant d'entrer directement avec leurs véhicules de secours et de rouler sur les voies (ce qui est impossible avec des voies posées sur ballast).

Une des solutions alternatives consiste à supprimer le ballast pour fixer directement les rails sur une dalle en béton armé.

De telles techniques existent depuis plusieurs années et sont régulièrement appliquées pour la construction de voies en tunnels ferroviaires ou dans les métros, y compris pour des lignes à grandes vitesses.

Crédit photographique

Cimbéton, Edilon, soldats-du-feu.com,
Journal des Sapeurs-pompiers
suisses & FSSP, Agilis,
tous droits réservés.

Mise en page et réalisation

Amprincipe Paris
R.C.S. Paris B 389 103 805

Impression



CENTRE D'INFORMATION SUR LE CIMENT ET SES APPLICATIONS

7, place de la Défense • 92974 Paris-la-Défense Cedex • Tél. : 01 55 23 01 00 • Fax : 01 55 23 01 10
E-mail : centrinfo@cimbeton.net • internet : www.infociments.fr