

La résistance au feu de la tranchée couverte au portail ouest du tunnel de base du Montcenis

The fire resistance of the cut and cover west portal of the Mont Cenis Base Tunnel

Luigi PINCHIAROGGIO, *TELT s.a.s., Turin, Italie*

Lorenzo BRINO, *TELT s.a.s., Turin, Italie*

Frédéric FABRE, *TELT s.a.s., Le Bourget du Lac, France*

Stefano LIONE, *TELT s.a.s., Turin, Italie*

Sébastien ARNAUD, *INGÉROP, Vienne, France*

Résumé

La tranchée couverte s'inscrit dans le projet de la nouvelle ligne ferroviaire Lyon-Turin. Située sur la commune de Villard-Clément, elle permet le raccordement entre la partie à l'air libre coté France et l'entrée du Tunnel de base du Montcenis. L'ouvrage, après le nouveau pont sur l'Arc, permet le passage de la ligne ferroviaire sous l'autoroute A 43 et la RD1006 existantes.

La conception structurelle, pendant les différentes phases des études, a été menée en application des règlements sur la résistance contre l'incendie prévus dans le Cadre réglementaire du projet en intégrant les avis de la Commission Intergouvernementale. Les calculs ont été menés selon le degré d'analyse G2 défini dans le guide CETU « Comportement au feu des tunnels routiers », qui prévoit un modèle linéaire dans sa globalité et non linéaire localement.

En phase travaux, des essais au four sont réalisés pour valider les formulations du béton, attester la résistance des matériaux et sa conformité aux spécifications techniques.

L'article illustre les approches numériques adoptées lors de la phase de conception, selon les quatre courbes d'incendies prises en compte (ISO 834, HC, EUREKA, RWS). Il présente également les résultats des essais avec une attention particulière au retour d'expérience pour le tunnel de base jusqu'à l'exploitation des ouvrages.

Abstract

The cut-and-cover tunnel is part of the new Lyon-Turin rail line project. Situated in the municipality of Villard-Clément in France, it allows the connection between the open-air works on the French side and the access to the Mont Cenis Tunnel. After the new bridge over the Arc River, the structure allows the railway line to pass under the existing A43 highway and the RD1006 main road.

The structural design during the various study phases has incorporated the fire resistance regulations set out in the project regulations and includes the advice of the Intergovernmental Commission. The calculations were made in agreement with the G2 degree of analysis specified in the CETU guide (*Comportement au feu des tunnels routiers* - Fire behaviour in road tunnels) which provides for a linear overall model and a local non-linear model.

During the construction phase, oven tests were carried out to validate the formulations of concrete, to certify the strength of the materials and their compliance with technical specifications.

This paper illustrates the digital approaches adopted in the design phases according to the four fire curves (ISO 834, HC, EUREKA, RWS) considered and the expected test results. Particular attention is given to the feedback which should be considered in the execution phase until the work become operational.

La résistance au feu de la tranchée couverte au portail ouest du Tunnel de base du Montcenis

The fire resistance of the cut and cover west portal of the Mont Cenis Base Tunnel

Luigi PINCHIAROGGIO, *TELT s.a.s., Turin, Italie*

Lorenzo BRINO, *TELT s.a.s., Turin, Italie*

Frédéric FABRE, *TELT s.a.s., Le Bourget du Lac, France*

Stefano LIONE, *TELT s.a.s., Turin, Italie*

Sébastien ARNAUD, *INGÉROP, Vienne, France*

1 Introduction

La nouvelle ligne ferroviaire Lyon-Turin fait partie intégrante du « Corridor méditerranéen » du projet européen TEN-T.

Le réseau de transport TEN-T est le nouveau « Métro en Europe » destiné à favoriser la circulation des passagers et des marchandises grâce à un moyen de transport écologique : le train. L'objectif est de diminuer l'utilisation du transport routier, ce qui augmente la pollution et les émissions de gaz à effet de serre. Dans ce réseau, la nouvelle liaison ferroviaire Lyon-Turin est située à l'intersection des deux grands axes de communication entre le nord et le sud et entre l'est et l'ouest de l'Europe. C'est le maillon central du « Corridor méditerranéen », qui dessert 18% de la population de l'UE, dans des régions qui représentent environ 17% du PIB européen. Les travaux contribueront au changement nécessaire des habitudes de transport, en particulier dans une zone particulièrement délicate comme la région alpine.

La Figure 1 suivante montre le profil schématique du Tunnel de base du Montcenis qui représente l'ouvrage principal de la ligne. D'une longueur de 57,5 km - dont 45 km en France et 12,5 km en Italie – il est constitué de deux tubes ferroviaires à voie unique. Il relie les futures gares internationales de Saint-Jean-de-Maurienne et de Suse, avec des interconnexions au réseaux existants en France et en Italie.

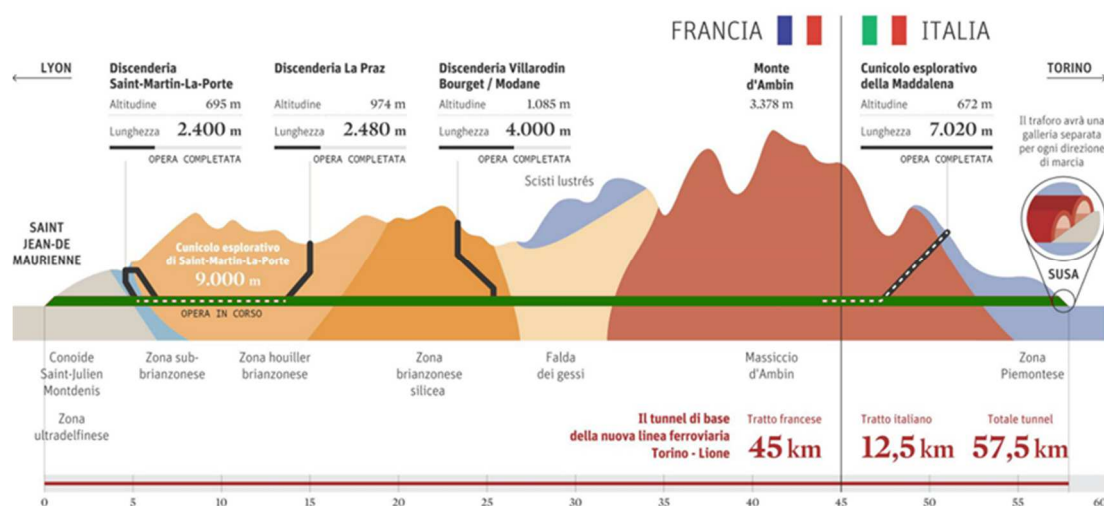


Figure 1. Profil schématique du Tunnel de base du Montcenis

La tranchée couverte de Saint-Julien-Mont-Denis, située au portail ouest du Tunnel de base du Montcenis dans la commune de Villard-Clément, permet le raccordement entre la partie à l'air libre coté France et l'entrée du tunnel.

L'ouvrage commence peu après la sortie du nouveau pont sur l'Arc et permet le passage ferroviaire sous l'autoroute A 43 et la RD1006 existantes. A ce titre, un phasage des travaux pour la déviation des

voiries et la construction du cadre a été mis en place pour le chantier, dont les travaux ont débuté au premier trimestre 2019.

La conception structurelle pendant les différentes phases des études, a été menée en application des règlements sur la résistance à l'incendie prévus dans le Cadre réglementaire du projet, qui intègre les critères de sécurité de la Commission Intergouvernementale.

En phase travaux, des essais au four sont réalisés pour valider les formulations du béton, attester la résistance des matériaux et sa conformité aux spécifications techniques.

L'article illustre les approches numériques adoptées lors de la phase de conception, selon les courbes d'incendies retenues. Il présente également les résultats des essais avec une attention particulière au retour d'expérience pour le tunnel de base jusqu'à l'exploitation des ouvrages.

La Figure 2 suivante montre la coupe transversale de l'ouvrage.

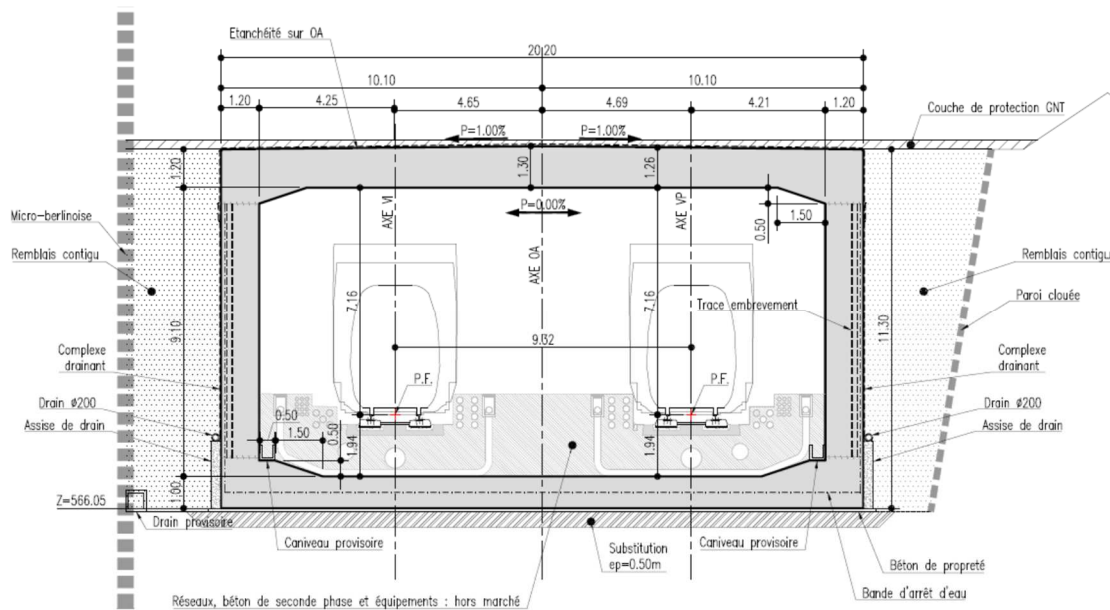


Figure 2. Coupe de l'ouvrage en béton

2 Approches de calcul utilisées dans les différentes phases de conception

Les études de la tranchée couverte ont été développées sur trois phases de conception, chacune ayant une approche de calcul différente à la résistance au feu calibrée par rapport au niveau de détail requis.

Les trois niveaux de conception ont été :

- Projet de référence (PR - 2014), pour la phase des études préliminaires visant à définir l'estimation du montant des travaux et à obtenir les autorisations et les approbations nécessaires,
- Études de niveau projet (PRO - 2017), développées par le Maître d'œuvre pour rédiger les documents de consultation des entreprises,
- Etudes d'exécution (EXE - 2019), développées par l'entreprise en phase travaux.

Le cadre normatif et réglementaire a été basé sur les Normes NF, les Eurocodes, les Documents Techniques Unifiés (DTU), le BAEL, les Recommandations de l'AFTES et les Guides du CETU.

Notamment pour les aspects relatifs à la résistance à l'incendie, la modélisation des éléments structuraux et leurs vérifications ont été effectuées selon les guides CETU :

- Comportement au feu des tunnels routiers – guide méthodologique – mars 2005,
- Compléments au guide Comportement au feu des tunnels routiers – mars 2011.

Dans ce chapitre, les approches numériques utilisées dans les trois phases de conception sont illustrées.

2.1 Projet de référence

En conformité avec les normes STI et les Critères de sécurité d'exploitation approuvées par la Commission Intergouvernementale pour la Nouvelle Ligne Ferroviaire Lyon-Turin, les vérifications ont été effectuées selon les quatre courbes d'incendies suivantes :

- ISO 834 – résistance de la structure pour assurer un minimum de 240 minutes,
- Courbe d'hydrocarbures HC – résistance de la structure pour assurer un minimum de 120 minutes,
- Courbe EUREKA,
- Courbe RWS – résistance de la structure pour assurer un minimum de 120 minutes,

représentées dans les graphiques température – temps des Figures 3, 4, 5 et 6.

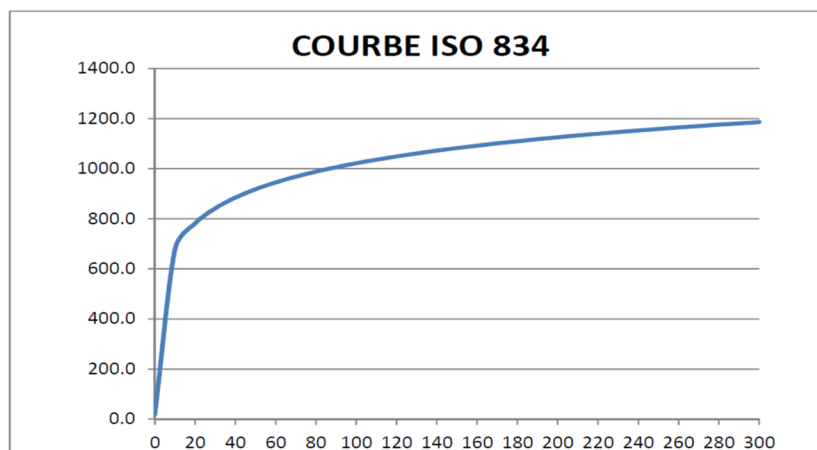


Figure 3. Courbe d'hydrocarbures ISO 834

La courbe ISO 834, dite aussi courbe normalisée CN, est représenté par la formule :

$$\Theta = 345 \log (8t + 1) + 20 \quad (1)$$

Où : Θ est la température des gaz en degrés Celsius et t le temps en minutes.

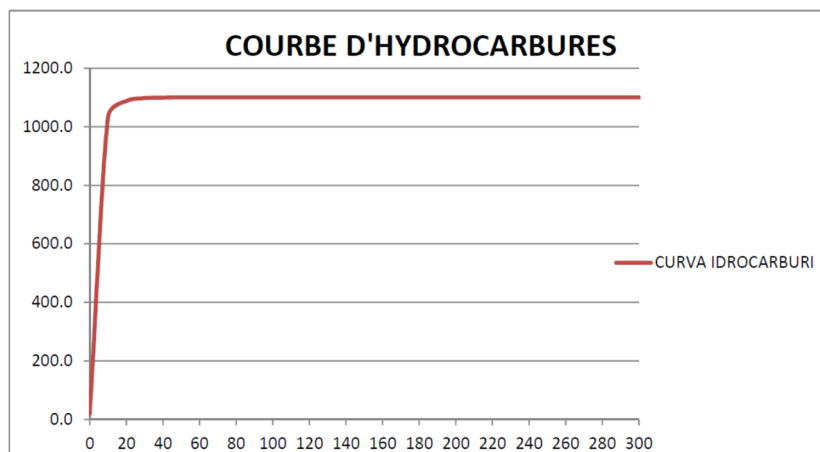


Figure 4. Courbe d'hydrocarbures HC

La courbe d'hydrocarbure HC est représenté par la formule :

$$\Theta = 1080 (1 - 0,325 e^{-0,167t} - 0,675 e^{-2,5t}) + 20 \quad (2)$$

Où : Θ et t représentent toujours la température des gaz en degrés Celsius et le temps en minutes.

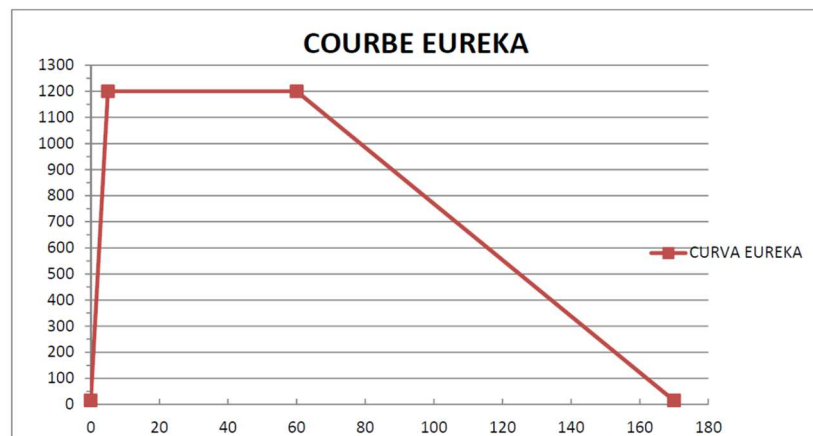


Figure 5. Courbe EUREKA

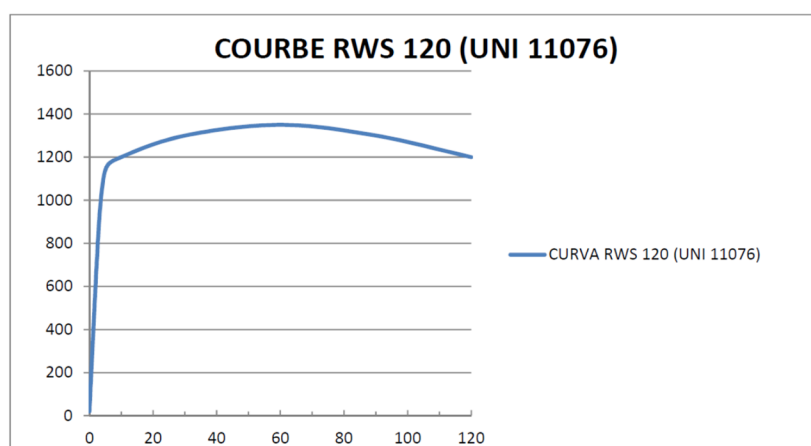


Figure 6. Courbe RWS

Sur la base de ces courbes, l'évolution de la température à l'intérieur de la section a été modélisée en fonction du temps passé à l'aide de la méthode de calcul P0862 Lombardi SA®. Cette méthode simplifiée permet d'obtenir l'évolution de la température au sein de la section divisée en bandes parallèles d'épaisseur définie (1 cm).

Les lignes de température atteinte au centre de gravité de l'armature tendue (environ 5 cm du bord exposé au feu) ont été déterminées pour chaque courbe en obtenant les valeurs maximales de température représentées dans le Tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1. Valeurs maximales de température au centre de l'armature (°C)

Courbes d'incendies			
ISO 834	HC	EUREKA	RWS
564	444	418	504

La vérification au feu des sections structurelles a suivi les règles de l'Eurocode 2 – "Conception des structures en béton – partie 1 – 2 : règles générales – Conception structurelle contre l'incendie" basées sur la formule suivante :

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} \times E_d \leq R_{d,t,fi} \quad (3)$$

où :

E_d est la valeur de la contrainte à la température ambiante selon la combinaison ELU fondamentale

$$G_k + \psi_{fi} \times Q_{k1}$$

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} \times Q_{k1}}{\gamma_G \times G_k + \gamma_{Q1} \times Q_{k1}} = 0,74 \text{ (dans le cas d'action permanente)}$$

$$\gamma_G \times G_k + \gamma_{Q1} \times Q_{k1}$$

$$R_{d,t,fi} \text{ résistance lors d'un incendie} = k_{\theta} \cdot R_k / \gamma_{M,fi}$$

avec :

k_{θ} : facteur de réduction de la résistance caractéristique des matériaux dépendant de la température,

R_k : résistance caractéristique des matériaux,

$\gamma_{M,fi} = 1$ facteur de sécurité partiel en situation d'incendie.

Le Tableau 2 suivant montre les températures moyennes (°C), pour chaque courbe d'incendie et par rapport à l'épaisseur de la section, et les facteurs relatifs de réduction de la résistance caractéristique du béton.

Tableau 2. Températures moyennes (°C) par rapport à l'épaisseur de la section et facteurs de réduction de la résistance du béton $k_{\text{béton}\theta}$ (réf. Tableau 3.1 Eurocode 2)

Courbes d'incendies		Épaisseur de la section (cm)			
		50	80	100	120
ISO 834	T_{m240}	174,20	116,40	97,10	84,4
	$k_{\text{béton}\theta}$	0,978	0,995	1,000	1,000
HC	T_{m120}	132,10	90,10	76,10	66,80
	$k_{\text{béton}\theta}$	0,990	1,000	1,000	1,000
EUREKA	T_{m120}	112,80	76,10	63,90	56,0
	$k_{\text{béton}\theta}$	0,996	1,000	1,000	1,000
RWS	T_{m120}	150,10	101,30	85,00	74,30
	$k_{\text{béton}\theta}$	0,985	1,000	1,000	1,000

Le Tableau 3 montre, pour chaque courbe d'incendie, les facteurs de réduction de la résistance caractéristique de l'acier atteinte dans le centre de gravité de l'armature avec les températures indiquées au Tableau 1.

Tableau 3. Facteurs de réduction de la résistance du l'acier $k_{\text{acier}\theta}$ (réf. Tableau 3.2a Eurocode 2)

Courbe			
ISO 834 $\Theta = 564^{\circ}\text{C}$	HC $\Theta = 444^{\circ}\text{C}$	EUREKA $\Theta = 418^{\circ}\text{C}$	RWS $\Theta = 504^{\circ}\text{C}$
$k_{\text{acier}\theta} = 0,582$	$k_{\text{acier}\theta} = 0,903$	$k_{\text{acier}\theta} = 0,960$	$k_{\text{acier}\theta} = 0,767$

Lors d'un incendie, des contraintes supplémentaires s'ajoutent aux contraintes survenant à la température ambiante du fait de l'augmentation de la température des faces exposées au feu. Ces contraintes ponctuelles ont été ajoutées au modèle sous la forme de dilatation et de rotation associées à l'augmentation de la température à l'intérieur de la section et par rapport aux relations contraintes-déformations des matériaux indiquées par l'Eurocode 2, pour chaque courbe, en fonction de l'épaisseur de la section considérée et des températures moyennes relatives.

En référence à la combinaison d'incendie la plus défavorable (combinaison exceptionnelle), en présence de la charge variable dominante, les éléments structuels ont été vérifiés pour chaque courbe d'incendie.

À titre d'exemple, le Tableau 4 montre la comparaison entre les sollicitations au niveau des sections résistantes, avec des épaisseurs de 120 cm et 100 cm, pour les éléments structuels de la coupe d'entrée de la tranchée couverte.

Tableau 4. Sollicitation éléments structuelles de la coupe d'entrée

Dalle	Sollicitations	Courbes d'incendies			
		ISO 834	HC	EUREKA	RWS
Supérieure (traverse)	N (kN)	-331,40	-339,20	-319,40	-336,70
	M (+) max (kNm)	+2247,20	+2263,30	+2417,30	+2205,70

(ép. 120cm)	M (-) max (kNm)	-3200,30	-3176,70	-3041,20	-3236,70
	T (kN)	1202,90	1201,70	1204,80	1202,10
	N (kN)	-524,20	-508,00	-527,80	-514,70
Inférieure (radier) (ép. 100cm)	M (+) max (kNm)	+1673,50	+1906,20	+1933,50	+1781,60
	M (-) max (kNm)	-3366,10	-3271,30	-3315,20	-3354,20
	T (kN)	1392,90	1398,20	1400,80	1396,70

2.2 Etudes de niveau projet

Pour les hypothèses et le calcul des températures dans les sections de l'ouvrage, les quatre mêmes courbes d'incendie que la phase PR ont été utilisées. L'élévation de température a été transformée en cas de charge équivalent : gradient + dilatation et, donc, combinée aux autres charges applicables en situation accidentelle.

L'approche utilisée a été basée sur la méthode suivante.

Une analyse thermique transitoire, au moyen du logiciel ANSYS®, a été effectuée pour chaque condition de feu appliquée à chaque type de section béton caractérisée par son épaisseur. Le calcul transitoire thermique a repris la méthodologie décrite dans l'Eurocode 1 partie 1-2, avec les données de caractéristiques des matériaux définies à partir de l'Eurocode 2 Partie 1-2 (comme pour la phase PR).

Pour le calcul de la distribution des températures, la présence des armatures dans le béton armé est négligée (Eurocode 2 Partie 1-2 §4.3.2(4)). Toutefois, dans la suite du calcul, le ferrailage (localisation et section) joue un rôle important dans l'équilibre, la raideur et la résistance des sections. Donc, ces données de localisation et de section d'armatures ont été définies dans chaque calcul thermique. Les barres ont été modélisées en les positionnant au droit du centre de gravité de chaque couche d'armature, et leur température a été estimée au moyen d'une interpolation linéaire de la température des nœuds béton voisins. Les éléments PLANE55® ont été utilisés pour le calcul thermique en discrétisant les sections au moyen des éléments 2D thermiques avec l'intégration des éléments surfaciques, SURF151®, placés de part et d'autre de la section afin d'intégrer au modèle les échanges thermiques par rayonnement avec le feu.

L'analyse de la résistance de la structure sous chargement incendie est effectuée par une méthode simplifiée linéaire de type G1, au sens du guide du CETU, avec :

- déformation thermique linéaire dans les sections, définie par une dilatation moyenne et une courbure calculées de sorte qu'elles soient équivalentes à la déformation thermique réelle,
- sections élastiques de rigidité dépendant de la rigidité des matériaux de la section, en fonction de la température locale.

Le calcul thermique a indiqué que les cas de charges équivalents au feu les plus importants sont obtenus pour la courbe ISO 834. La Figure 7 montre la distribution de la température pour une section d'épaisseur 130cm (épaisseur de la dalle supérieure adoptée en phase PRO) avec la courbe ISO 834. La même distribution est représentée dans la Figure 8 dans laquelle l'évolution de la température est montrée au moyen d'une courbe à partir de laquelle deux aspects méritent d'être signalés :

- a) la température reste constante au-delà d'une épaisseur de 40cm depuis la surface exposée au feu (environ 20 °C),
- b) la température atteinte au centre de gravité de l'armature tendue (environ 5 cm du bord exposé au feu) est d'environ 430°C.

Ces aspects indiquent qu'une modélisation plus précise du phénomène, par rapport à ce qui a été réalisé préalablement en phase PR, a permis de mieux calibrer la distribution de température de façon moins conservatrice.

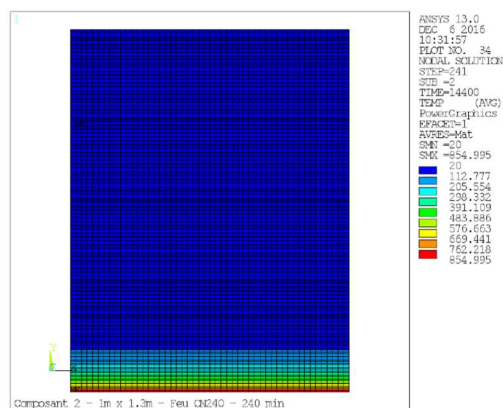


Figure 7. Distribution de la température pour une section d'épaisseur 130cm (ISO 240)

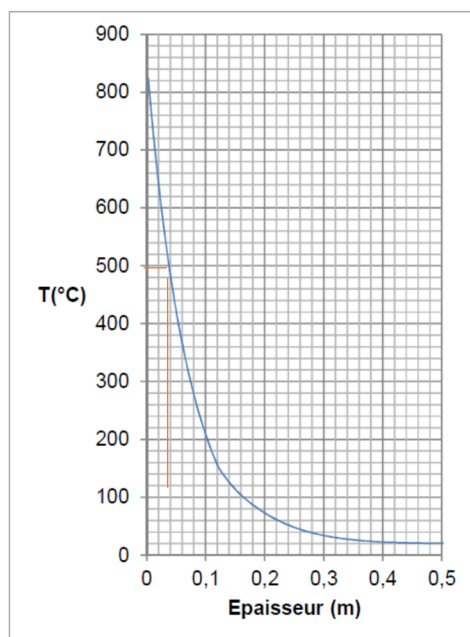


Figure 8. Courbe de distribution de la température pour une section d'épaisseur 130cm

2.3 Etudes d'exécution

Les hypothèses générales pour le calcul des ouvrages au feu en phase EXE prévoient que la tranchée couverte doit assurer une résistance au feu de 4 heures selon la courbe normée ISO 834, de 2 heures selon la courbe HC et de 2 heures selon la courbe RWS.

Le graphique température – temps résultant est représenté dans la Figure 9.

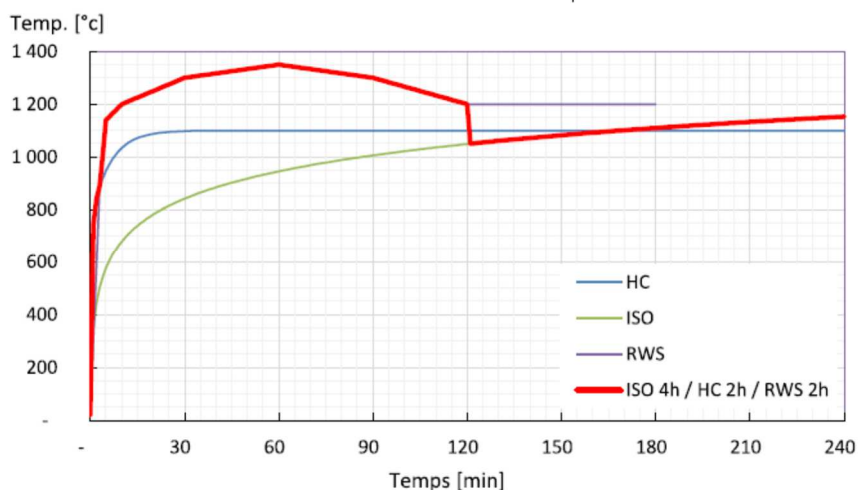


Figure 9. Graphique température – temps phase EXE

La courbe d'incendie EUREKA, utilisée pour les phases d'études précédentes, n'a plus été utilisée car elle n'est pas évoquée dans la mise à jour récente des normes STI.

Le degré d'analyse a été mené en conformité au niveau G2 défini dans le guide CETU « Comportement au feu des tunnels routiers » selon un modèle linéaire dans sa globalité, mais non linéaire localement:

- admissibilité des déformations mécaniques des matériaux des rotules plastiques,
- stabilité globale de la structure: nombre de rotules plastiques inférieur ou égal au degré hyperstatique.

Les calculs au feu ont consisté à vérifier les combinaisons suivantes aux ELU accidentels:

- $1 \times G$ (charges permanentes) + $1.0 \times T_{\text{incendie}}$ (effets thermiques de l'incendie) + 1.0 ou $0.0 \times Q_{\text{fréquent(LM1)}}$, par un calcul de type G2 (= combinaison pendant le feu)
- $1 \times G$ (charges permanentes) + $0.0 \times T_{\text{incendie}}$ (effets thermiques de l'incendie) + $1.0 \times Q_{\text{fréquent(LM1)}}$ par un calcul linéaire mais avec des sections dont l'épaisseur a été réduite de l'épaisseur du béton ayant dépassé 500°C (prise à 5cm) (= combinaison après le feu)

Pour le calcul de type G2, les modèles numériques ont été produit à l'aide du logiciel éléments finis SAFIR®, développé par l'Université de Liège, sur la base de l'approche suivante :

- Calcul du transfert thermique pour permettre de définir le champ de température à l'intérieur du ou des éléments étudiés, évalué en fonction de ses caractéristiques géométriques et de sa composition. Le modèle thermique considère une sollicitation thermique avec une prise en compte des côtés de l'élément exposé au feu et l'évolution des propriétés thermiques des matériaux en fonction de la température.
- Calcul du comportement thermomécanique évalué en fonction du profil d'échauffement établi au cours de l'étape précédente. Les effets des déformations et des contraintes d'origine thermique, induites à la fois par les élévations de température et les gradients thermiques sont pris en compte. L'effet des non-linéarités géométriques, de la capacité de rotation plastique des sections, sont pris en compte dans le modèle.

L'évolution de la température, obtenue dans le modèle pour une section caractéristique de la dalle supérieure, est représentée dans la Figure 10.

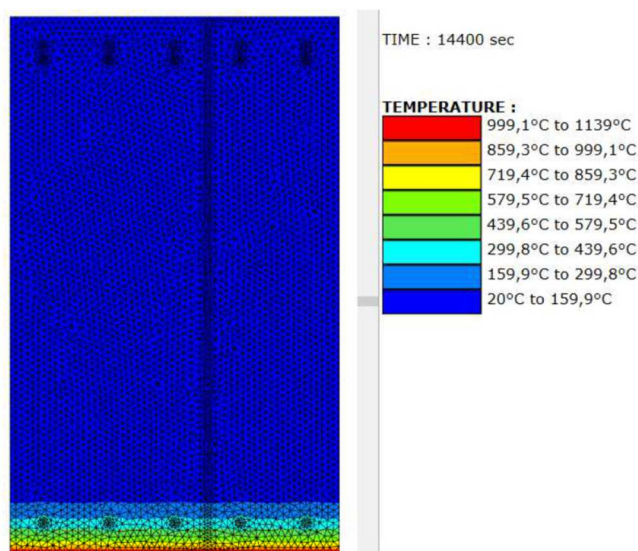


Figure 10. Distribution de la température pour une section d'épaisseur 130cm

Au niveau du centre de gravité de l'armature tendue (environ 5 cm du bord exposé au feu) la température présente une valeur maximale d'environ 440°C , très proche à la valeur de 430°C obtenu dans le model utilisé en phase PRO.

2.4 Essais au feu en phase travaux

La procédure d'exécution des essais au feu du béton de la tranchée couverte, réalisée pendant la phase travaux (avant la réalisation de l'ouvrage), prévoit deux étapes.

La première étape dite « de sélection » permet la sélection de la formulation du béton (notamment du taux de fibres polypropylène) pour l'essai de convenance par la réalisation d'essais de comportement au feu sur plusieurs dalles de taille réduite, avec chacune une formulation différente (un taux de fibres différent).

La deuxième étape dite « de convenance » consiste à réaliser un essai avec la formulation retenue à l'étape précédente, sur une dalle dont la géométrie se rapproche de la géométrie réelle et chargée de façon à reproduire les sollicitations rencontrées dans l'ouvrage définitif à l'état permanent.

Les deux étapes sont effectuées au sens du Guide CETU « Comportement au feu des tunnels routiers et ses compléments »

2.4.1 Mode opératoire : essais de sélection

Les prescriptions imposées pour la réalisation prévoient que l'ouvrage doit avoir un degré de stabilité au feu 4 h sous la courbe d'incendie ISO 834. De plus, les performances des bétons doivent présenter un écaillage d'épaisseur d'au plus 1 cm lors d'une montée en température correspondante aux courbes ISO834 (4h), HC (2h), RWS (2h). Ces différentes sollicitations thermiques sont couvertes par la courbe enveloppe (RWS 120 + ISO 834).

L'écaillage a été vérifié par des essais de comportement au feu pour chaque formulation de béton envisagée avec différents dosages en fibres de polypropylène. Ce niveau de performance doit être atteint par le béton seul, sans recours à aucune protection particulière.

Pour vérifier le niveau de tenue au feu requis sur l'ensemble du linéaire du cadre de la tranchée couverte (dalle supérieure et piédroits) un essai enveloppe a été adopté, dont la sollicitation thermique est la suivante :

- l'action thermique suit la courbe RWS pendant les 120 premières minutes,
- après 120 minutes et jusqu'à 240 minutes l'action thermique appliquée suit la courbe ISO 834,

avec un graphique température – temps illustré à la Figure 9ci-dessus.

Dans le but de vérifier la propension à l'écaillage du béton, quatre dalles ont été réalisées (selon la NF 1363-1). Celles-ci ont été fabriquées avec les matériaux de chantier, selon des dosages et des moyens de fabrication représentatifs de l'ouvrage, et quatre différents dosages en fibres de polypropylène. Les dimensions des dalles sont (1,70m x 0,98m x 0,30m). Le taux de ferrailage et l'enrobage sont également représentatifs de l'ouvrage.

L'objectif est d'appréhender la propension à l'écaillage du béton et de choisir la meilleure formulation de béton parmi celles proposées pour réaliser l'essai de convenance.

Les quatre dalles sont coulées à l'horizontal et la face coffrée doit être la face exposée au feu, ce qui est représentatif de la situation en place. Les côtés de chaque dalle sont recouverts d'une laine minérale. Elles sont juxtaposées horizontalement et positionnées en lieu et place du toit du four.

Le pilotage thermique du four est réalisé au moyen de 8 pyromètres à plaque et un enregistrement vidéo de la face exposée au feu de chaque dalle est réalisé à l'aide d'une caméra endoscopique haute température. La vidéo permet de déterminer le temps d'apparition d'éventuels phénomènes d'écaillage.

Les corps d'épreuve pour essais au feu sont conservés en salle climatisée dont la consigne en température est fixée à 23°C et dont les évolutions thermique et hygrométrique sont mesurées et enregistrées. Selon la norme NF EN 1363-1, les produits en béton ne doivent pas être soumis aux essais tant qu'ils n'ont pas été conditionnés pendant au moins 90 jours.

À la fin de l'essai de sélection, les dalles font l'objet d'une analyse qualitative pour choisir la formulation qui présente les meilleurs résultats vis-à-vis du comportement à l'écaillage, afin d'utiliser la même formulation pour la réalisation de l'essai de convenance.

2.4.2 Mode opératoire : essai de convenance

Après les essais de sélection et le choix de la meilleure formule pour le comportement du béton à l'écaillage, il est possible de procéder à l'essai de convenance. À cet égard, et pour gagner le temps nécessaire au séchage des dalles, quatre dalles de convenance sont confectionnées en même temps que les dalles de sélection à partir des 4 formules de béton retenues. Évidemment seule la dalle avec la même formule du béton retenue à l'issue de la sélection est testée.

La dalle de convenance doit être représentative de la section de l'ouvrage la plus pénalisante du point de vue de l'écaillage. Cette section enveloppe est déterminée par le laboratoire d'essai.

L'étude est réalisée sur la base de deux sections thermiques représentatives, l'une de la dalle de couverture, l'autre des piédroits. Les résultats obtenus pour les deux sections thermiques soumises à l'évaluation, permettront de déterminer la section la plus pénalisante couvrant l'ensemble des éléments constituant la tranchée couverte (la dalle de couverture et les piédroits).

Après cette étude, et notamment après l'évaluation de la configuration la plus pénalisante, il a été possible de dimensionner les corps d'épreuve pour lesquelles les dimensions suivantes sont prévues : 8m x 1,60m x 0,50m.

Pendant l'essai, l'état de charge et de contrainte en service doit être reproduit par assurer le pic maximum de contrainte (en compression sur la face exposée au feu) auquel l'élément structurel réel pourrait être soumis au moment de l'incendie.

Il est à préciser que les calculs de contraintes dans l'élément sont réalisés par une modélisation aux éléments finis selon ce qui suit, pour la dalle de couverture et pour les piédroits :

- modélisation du corps d'épreuve,
- simulation numérique à chaud sous les 3 cas de chargement thermique (ISO 834, HC et RWS),
- détermination des profils de contraintes dans la section à différents pas de temps d'exposition.

Evidemment ces valeurs doivent tenir compte des autocontraintes générées par l'exposition au feu dans les éléments.

L'action thermique appliquée est identique à celle décrite pour les essais de sélection (voir Figure 8) et le pilotage thermique du four est réalisé au moyen de 8 pyromètres à plaque.

La charge totale de départ, effectuée à l'aide de plusieurs vérins hydrauliques, est appliquée sur la dalle de convenance au minimum 15 minutes avant le départ thermique de l'essai. Ensuite, la charge appliquée peut évoluer selon le scénario éventuellement prédéterminé.

Un enregistrement vidéo de la face exposée au feu de la dalle testée est réalisé à l'aide de 2 caméras endoscopiques haute température. La vidéo permet de déterminer le temps d'apparition d'éventuels phénomènes d'écaillage.

La dalle est équipée de 3 grappes de 7 thermocouples répartis dans l'épaisseur de béton. Ces 3 grappes de thermocouples sont implantées au centre et au quart d'une diagonale de la face exposée au feu. La température moyenne en face non exposée du voussoir est relevée par 5 thermocouples de surface positionnés au centre de la dalle et aux centres de chaque quart de la surface exposée au feu.

Les déplacements verticaux sont mesurés depuis la face non exposée du voussoir à l'aide de 3 capteurs de déplacement à câble mis en œuvre sur l'axe longitudinal du voussoir : un au centre de la dalle, deux à 50 mm à chaque extrémité de la dalle.

Les corps d'épreuve pour essais au feu sont conservés en salle climatisée dont la consigne en température est fixée à 23°C et dont les évolutions thermique et hygrométrique sont mesurées et enregistrées. Selon la norme NF EN 1363-1, les produits en béton ne doivent pas être soumis aux essais tant qu'ils n'ont pas été conditionnés pendant au moins 90 jours. Cette contrainte est respectée, la dalle ayant été produite en même temps que les dalles des essais de sélection.

Pour permettre de faire le suivi de la teneur en eau au jour de l'essai, une éprouvette de dimensions 20cm x 20cm x 20cm est fabriquée. Avec le même principe trois éprouvettes cubiques 15cm x 15cm x 15cm sont produites en même temps que les corps d'épreuve pour déterminer la résistance à la compression des bétons au jour de l'essai. Toutes les éprouvettes sont conservées dans les mêmes conditions environnementales que les corps d'épreuve.

À la fin de l'essai de convenance, la valeur d'écaillage est mesurée et comparée à la valeur prise en compte dans les calculs de dimensionnement au feu. La précision de mesure de l'écaillage est +/- 2mm selon un maillage de 3mm x 3mm. Pour ce faire, la surface exposée au feu de chaque dalle de convenance est numérisée en 3D avant et après l'essai au feu à l'aide d'un scanner laser. Les données numérisées sont exploitées par superposition des nuages de points de façon à évaluer la profondeur d'écaillage du voussoir et connaître le pourcentage de la surface écaillée.

Afin d'obtenir une évaluation correcte de l'écaillage il est nécessaire de souligner que l'acquisition numérique du relief de surface doit nécessairement se faire immédiatement après l'essai au feu. C'est essentiel pour éviter que la mesure soit affectée par l'évolution de la surface du béton due à la réhydratation de sa partie superficielle. Le phénomène de réhydratation du béton se produit au-delà d'une température de l'ordre de 700 °C à 800 °C, à partir de laquelle le calcaire se décarbonate pour former de la chaux vive. La chaux formée est très hydrophile et va rapidement se réhydrater lors du refroidissement en mobilisant l'humidité présente dans l'air. En se réhydratant, la chaux se dilate pour former de la chaux éteinte qui produit un gonflement localisé de la surface exposée, associé à la chute du matériau néoformé. Cette perte de matière qui peut être centimétrique, donc du même ordre de grandeur que l'épaisseur sacrificielle, est à différencier de la notion d'écaillage et ne doit pas être prise en compte lors des mesures. Pour ce faire, les corps d'épreuve doivent sortir rapidement du four après extinction des brûleurs et numérisés immédiatement, avant la réaction de la surface exposée avec l'humidité ambiante.

2.4.3 Résultats des essais au feu

Les résultats des essais au feu, effectués avant l'exécution des travaux de béton de la tranchée couverte, sont illustrés ci-dessous.

Les quatre dalles (essais de sélection) ont été fabriquées à partir de la formule de béton C30/37 XF3 D3 350 kg CEM I 52SR3PM Dmax 20. Chaque dalle présente un teneur différent en fibres de polypropylène:

- dalle A : teneur en fibres de polypropylène 0,6 kg/m³
- dalle B : teneur en fibres de polypropylène 0,9 kg/m³
- dalle C : teneur en fibres de polypropylène 1,2 kg/m³
- dalle D : teneur en fibres de polypropylène 1,5 kg/m³

avec un ferrailage composé de deux nappes de treillis soudés (ST50 C en face exposée au feu et S25 en face non exposée au feu) et un enrobage de 60mm.

La teneur moyenne en eau et la résistance en compression moyenne des bétons, déterminées au jour de l'essai sur trois des échantillons prélevés dans chaque éprouvette coulée en même temps des dalles, sont indiquées dans le Tableau 5 ci-dessous.

Tableau 5. Teneur en eau moyenne et résistance moyenne en compression au jour de l'essai de sélection

	dalle A	dalle B	dalle C	dalle D
Teneur en eau (%)	4,1	3,9	4,2	3,9
Résistance en compression (MPa)	42,3	45,8	45,5	40,6

Après la phase de chauffage en four, conduite selon l'application de l'action thermique indiqué dans le graphique température – temps montré à la Figure 9, aucun écaillage n'est constaté sur les quatre dalles.

Néanmoins, l'essai de convenance grande dimension étant soumis à un chargement, localement le béton peut présenter une susceptibilité à l'écaillage supérieure à l'essai de sélection. Il a donc été décidé de ne pas retenir la formulation présentant le plus faible taux de fibre, mais la suivante: c'est à dire la formulation de la dalle B pour l'essai de convenance grande dimension

La Figure 11 suivante montre les photos de la face exposée au feu de la dalle B, avant et après l'essai de sélection.



Figure 11. Face exposée au feu de la dalle B avant et après l'essai de sélection

La dalle soumise à l'essai de convenance a donc été confectionnée à partir d'une formule de béton contenant un dosage en fibres polypropylène de $0,9 \text{ kg/m}^3$.

La teneur moyenne en eau et la résistance en compression moyennes des béton, déterminées au jour de l'essai sur trois des échantillons prélevés dans chaque éprouvette coulée en même temps que les dalles, ont été respectivement $4,0\%$ et $45,8 \text{ MPa}$.

En accord avec la procédure d'exécution des essais, pendant la phase de chauffage en four conduite selon l'application de l'action thermique indiquée dans la Figure 9, la dalle a été chargée avec l'état de charge et de contrainte préalablement déterminé pour assurer le pic maximum de contrainte auquel l'élément structurel réel pourrait être soumis au moment de l'incendie.

Le Tableau 6 suivant indique l'évolution linéaire de la charge appliquée à l'aide de deux vérin hydraulique articulés sur une poutre de répartition.

Tableau 6. Évolution linéaire charge appliquée sur la dalle

Temps (min)	0	14	20	27	35	44	53	240
Effort appliqué (daN)	4 727	6 727	9 727	13 727	19 727	29 727	39 727	39 727

Le résultat de cet essai n'a pas mis en évidence la formation d'écaillage avec un pourcentage de la surface écaillée, de la face exposée au feu, égal à 0% .

La Figure 12 suivante montre les photos de la face exposée au feu de la dalle, avant et après l'essai de convenance.



Figure 12. Face exposée au feu de la dalle avant et après l'essai de convenance

3 Conclusions

La réalisation de la tranchée couverte représente le premier retour d'expérience significatif sur le niveau de performance attendue en phase de réalisation et jusqu'à l'exploitation des ouvrages souterrains du tunnel de base du Montcenis.

L'analyse de l'évolution de la conception de ce premier ouvrage pendant plusieurs phases d'études successives et notamment les résultats des essais réalisés ont permis de confirmer les principes adoptés pour la tranchée couverte.

De plus ces résultats valident les stratégies des appels d'offre pour le tunnel de base de 57,5 km concernant les sujets tenue et vérification au feu des structures : en effet les DCE ont été établis sur des approches similaires de vérifications et essais de la tranchée.

Les structures du revêtement définitif exposées directement au feu devront satisfaire la norme française ITI 98-300 et, pour les ouvrages en territoire italien, la norme italienne UNI 11076. Vu l'intérêt de retenir des hypothèses plus réalistes et moins conservatrices que les études préliminaires, le calcul sera établi en utilisant la méthode non linéaire.

Les futurs bureaux d'études en charge des EXE devront justifier la stabilité de l'ouvrage pour le cas de charge d'incendie en conformité avec les Eurocodes et justifieront la profondeur d'écaillage retenue. Le respect de cette profondeur devra être confirmé par des essais au feu réalisés dans des laboratoires spécialisés et agréés avant la mise en œuvre des bétons.

De manière générale on peut affirmer que l'adoption de modèles de calcul de plus en plus affinés a conduit à des hypothèses moins conservatrices concernant les ratios d'aciers principaux d'armature et le ratio de fibres de polypropylène.

Ces optimisations, projetées à titre préliminaire à l'échelle de réalisation de l'ensemble des travaux en souterrain, pourraient conduire à une réduction importante des coûts, tout en maintenant les mêmes niveaux d'exigence et de fonctionnalité demandés.

4 Références

Brino L., 2012, La Nuova Linea Torino Lione: gli aspetti tecnici di un grande progetto transfrontaliero, Gallerie e Grandi Opere Sotterranee, n. 102: 11-15, Pàtron Editore

Brino L., Poti P., 2017, L'approccio alla sicurezza in fase di esercizio, Congrès SIG «Le grandi infrastrutture ferroviarie alpine in costruzione: le scelte progettuali e costruttive per la realizzazione di tunnel lunghi e profondi», Vérone, 23-24 février 2017

Bufalini M., Dati G., Rocca M., Scevaroli R., 2017, The Mont Cenis Base Tunnel, Geomechanics and Tunnelling, n. 3: 246-25

Directorate General for Mobility and Transport - European Commission, 2014, "Mediterranean Core Network Corridor Study - Final Report 2014"

Hyung-Jun Kim, Heung-Youl Kim, Jae-Sung Lee & Ki-Hyuk Kwan (2011) An Experimental Study on Thermal Damage and Spalling of Concrete Under Loading Conditions in a Tunnel Fire, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 10:2, 375-382, DOI: 10.3130/jaabe.10.375

Maraveas C., Vrakas A. A, Design of Concrete Tunnel Linings for Fire Safety, Structural Engineering International n°3 2014

Minh Tuyen Phan, Modélisation explicite de l'écaillage sous incendie du béton : approche thermohydro-mécanique avec des conditions aux limites évolutives. Université Paris-Est, 2012. Français. ffNNT : 2012PEST1155

Van Weyenberge B., Deckers X., Development of a risk assessment method for fire in rail tunnels, 7th International Conference 'Tunnel Safety and Ventilation' 2014, Graz

Virano M., 2016, Le scelte di buon uso del suolo e del sottosuolo negli attraversamenti alpini del nord ovest d'Italia lungo il Corridoio Mediterraneo. Gallerie e grandi opere sotterranee, n. 117

Virano M., 2017, Il tunnel di base del Moncenisio: le scelte di TELT all'interno di una strategia europea, Strade & Autostrade, n. April 2017

Vitek J.L., 2008, Fire resistance of concrete tunnel linings, Tailor Made Concrete Structures – Walraven & Stoelhorst, London