Dimensionnement d'une galerie souterraine d'essais soumise à des explosions et des incendies, à Montlaville (Oise, France)

Jean-Bernard Kazmierczak, Didier Jamois, Edgar Morin, C. Chaubert, O. Laveuve, J. Villedieu

▶ **To cite this version:**

Jean-Bernard Kazmierczak, Didier Jamois, Edgar Morin, C. Chaubert, O. Laveuve, et al.. Dimensionnement d'une galerie souterraine d'essais soumise à des explosions et des incendies, à Montlaville (Oise, France). 14ème Congrès international AFTES "Tunnels et espaces souterrains : risques et opportunités", Oct 2014, Lyon, France. ineris-01862450

HAL Id: ineris-01862450
https://ineris.hal.science/ineris-01862450

Submitted on 27 Aug 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Dimensionnement d'une galerie souterraine d'essais soumise à des explosions et des incendies, à Montlaville (Oise, France)

Design of an underground test gallery subject to blast and fire, in Montlaville (Oise, France)

J.B. Kazmierczak, *INERIS, Verneuil-en-Halatte, France*

D.Jamois, *INERIS, Verneuil-en-Halatte, France*

E. Morin, *NGE – Aménagements Souterrains, Tarascon, France*

C. Chaubert, *Solétanche Bachy Tunnels, La Garde, France*

O. Laveuve, *Bachy Tunnels, La Garde, France*

J. Villedieu, *NGE – Aménagements Souterrains, Tarascon, France*

Résumé

Pour évaluer la résistance de certains composants industriels (bombonnes, réservoirs, etc) à des sollicitations mécaniques et/ou thermiques, des essais spécifiques doivent être réalisés au sein d'ouvrages dédiés, tels que les galeries d'essai de l'INERIS situées à Montlaville dans l'Oise.

A l'occasion de leur rénovation, elles ont été conçues pour résister à des impacts de fragments métalliques de 300 kg ayant une énergie de 30 MJ et à un feu de 3 MW durant une demi-heure. Cela a nécessité un dimensionnement spécifique (Figure 0), incluant des bétons spéciaux résistants à des cycles de feu et une épaisse couche d'acier inoxydable et réfractaire. La spécificité de cet ouvrage est décrite dans l'article ainsi que les moyens qui ont permis son dimensionnement, les recommandations de l'AFTES n'étant pas adaptées dans ce cas particulier.

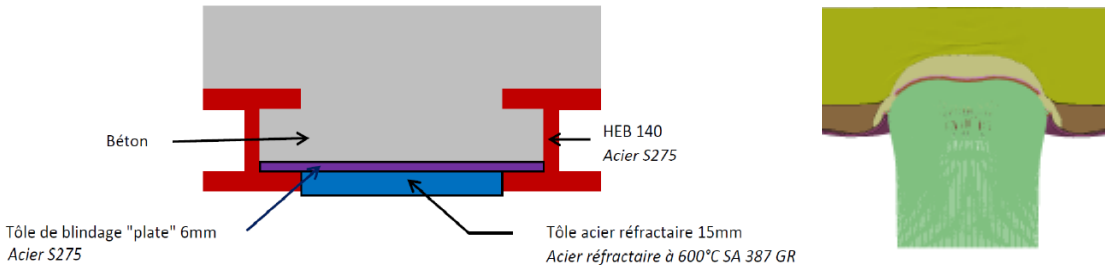

Figure 0 : Multi-couche de béton et d'acier inoxydable réfractaire – Simulation d'un impact

Abstract

In order to assess the resistance of some industrials devices (gas cylinders, tanks, etc) subject to mechanical or thermal solicitations, specific tests must be carried out inside special areas, such as the test galleries situated at Montlaville in the Oise county.

During their renovation, the galleries were designed to resist to a 300 kg metallic impact, of a 30 MJ energy and a 3 MW fire during half an hour. These conditions required a specific design (see Figure 0) composed of special concrete and a stainless refractory steel layer.

Due to the specificities of this site, the AFTES recommendations have not been used. So we expose here the methodology of the design of the test area.

Dimensionnement d'une galerie souterraine d'essais soumise à des explosions et des incendies, à Montlaville (Oise, France)

Design of an underground test gallery subject to blast and fire, in Montlaville (Oise, France)

J.B. Kazmierczak, *INERIS, Verneuil-en-Halatte, France*

D.Jamois, *INERIS, Verneuil-en-Halatte, France*

E. Morin, *NGE – Aménagements Souterrains, Tarascon, France*

C. Chaubert, *Solétanche Bachy Tunnels, La Garde, France*

O. Laveuve, *Bachy Tunnels, La Garde, France*

J. Villedieu, *NGE – Aménagements Souterrains, Tarascon, France*

1 Introduction

La géologie du département de l'Oise a fortement contribué à l'extraction de matériaux du sous-sol et par conséquent au creusement de cavités dans le département.

Les calcaires, et notamment ceux du Lutétien moyen (Eocène moyen), ont été exploités sur la partie sud de l'Oise. Que ce soit pour l'extraction de matériau, pour le stockage ou pour s'y réfugier, la nature géologique du sous-sol a ainsi fortement influencé la présence et la densité des cavités du département de l'Oise.

Certaines de ces carrières ont servi durant des décennies à la production de champignons, alors que d'autres ont connu un destin plus singulier. C'est ainsi que les carrières de Montlaville sont connues non seulement pour avoir hébergé Jacques Mesrine (l'ennemi public n°1 des années 70), mais également pour servir de socle aux essais d'incendies et d'explosions menés par l'INERIS. Un site souterrain ayant une vocation similaire existe en Suisse à Hagerbach.

La montée en puissance de ces essais a conduit l'INERIS à rénover et à moderniser l'une de ses galeries. Cela a nécessité un dimensionnement adapté aux spécificités d'utilisation de l'ouvrage. Ce contexte particulier et la démarche de dimensionnement sont explicités dans cet article.

2 Les essais réalisés dans la carrière de Montlaville

2.1 Les différents types d'essais

Le Laboratoire d'Essais à Grande Echelle (LEGE) de l'INERIS est un terrain d'environ 7 Ha incluant une zone pyrotechnique dédiée à la réalisation d'essais mettant en jeu des gaz, vapeurs ou poussières inflammables ainsi que des explosifs condensés. Ces essais ont pour objectifs d'étudier et caractériser les phénomènes dangereux depuis l'évènement initiateur (étude des fuites et des sources d'inflammation) jusqu'à ses conséquences (propagation de flammes, explosions). Ils ont également pour objectif d'évaluer les dispositifs de sécurité couramment utilisés dans l'industrie (arrête-flamme, évent, suppresseurs d'explosion,..) pour lutter contre les effets de ces phénomènes dangereux. Enfin, certaines activités expérimentales visent à déterminer la résistance de structures industrielles à ces agressions (flammes, ondes de pression, impacts). Ces structures peuvent être des éléments du bâtiment (murs, bardages, fenêtres, portes, cloisons) ou bien des objets inclus dans le procédé industriel lui-même (bouteilles sous pression, réacteurs, canalisations).

Des précautions particulières doivent être prises lorsque les tests envisagés sont susceptibles de produire des fragments, de façon attendue ou accidentelle. Dans ce cas, si la production de ces fragments est incompatible avec la sécurité du site (distance de projection trop élevée), les essais peuvent être confinés à l'intérieur d'une galerie qui les retiendra et résistera aux impacts.

Par ailleurs, la possibilité de travailler dans l'obscurité peut présenter des avantages pour certains essais (visualisation de flamme peu lumineuse par exemple). La stabilité en température et l'absence d'influence des conditions climatiques extérieures peuvent également être favorables lorsqu'il faut maîtriser les échanges thermiques (faibles gradient thermiques sur de grands volumes d'essais).

Cette galerie est un dispositif expérimental qui permet à l'INERIS de réaliser des essais de qualification très particulier comme par exemple soumettre un volume sous pression à un feu jusqu'à éclatement (Figure 1). Quelques essais ont été réalisés sur des bouteilles de 100 l gonflées à 700 bar et soumises à un incendie de 2MW (environ 1m^3 d'heptane). A noter que les feux en galerie nécessitent la plupart du temps de placer des écrans de protection thermique en partie haute au droit des flammes pour protéger la voute.

Figure 1 : (a) Bouteille en test, (b, c) dispositif avant l'essai et (d) durant l'essai, (e) fragments de la bouteille après éclatement

On peut également produire volontairement des fragments ou des projectiles pour qualifier des structures à l'impact. La Figure 2 illustre la production de fragments à l'aide d'une bombe constituée d'un tube acier contenant une charge explosive (équivalent TNT de 1kg). Cet essai a permis de caractériser la résistance à l'impact de matériaux plastiques (PMMA, PVC,..) lorsqu'ils sont utilisés pour la protection des personnes.

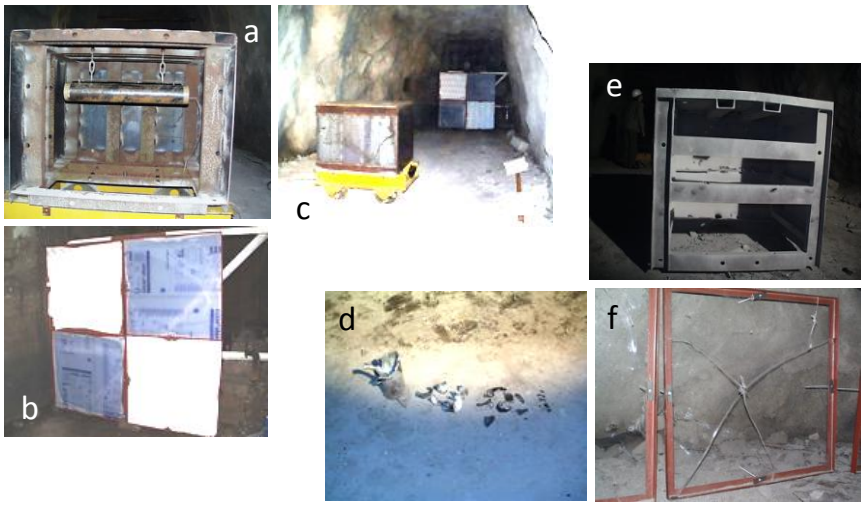

Figure 2 : (a) tube acier contenant la charge, (b)matériau plastique en test, (c) dispositif avant l'essai, (d) fragments du tube, (e)dispositif d'essai après éclatement (f) résultats des impacts sur le matériau en test

On comprend que ces essais nécessitent un environnement particulier et c'est dans ce contexte que s'incrit la galerie Cathédrale du LEGE de Montlaville.

2.2 Les exigences vis-à-vis de la galerie Cathédrale

La galerie dite Cathédrale, siège des essais d'incendie et d'explosion est une ancienne galerie borgne qui s'étend sur 60 m de longueur. Les quinze derniers mètres constituent la zone d'essais de section 3,5m x 3m. Elle dispose également d'une niche de section 2,8m x 2,4m (Figure 3).

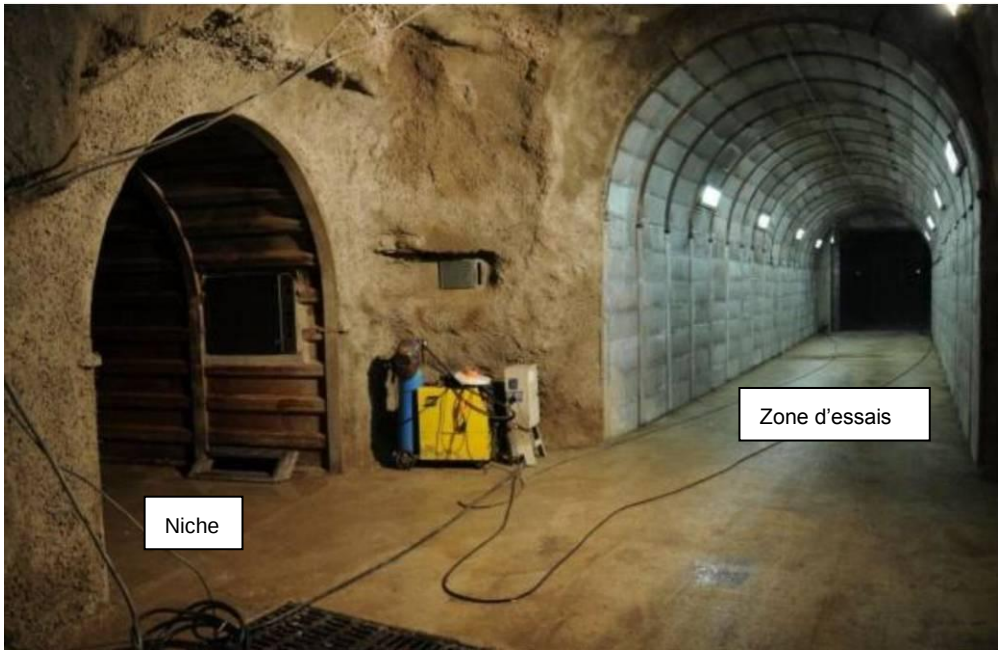

Figure 3 : Zone d'essai et niche de la galerie Cathédrale après rénovation

Cette zone est utilisée pour tous les essais destructifs qui ne peuvent être réalisés à l'extérieur, en particulier parce qu'ils produisent des fragments de forte énergie ou des nuisances pour le voisinage (bruit). Les nombreux tests menés ces dernières années ont détérioré la roche revêtue d'une simple couche de béton projeté. Par ailleurs, la nécessité de réaliser des essais de plus grande ampleur a conduit à engager la rénovation de cet ouvrage souterrain.

Les exigences vis-à-vis de la zone d'essai ont été définies de manière à pouvoir résister à :

- une onde de surpression maximale de 1,2 bar lors des explosions ;
- à un feu de 3 MW pendant 30 mn, avec une température de service de 500°C ;
- à des impacts de fragments métalliques de 300 kg ayant une énergie de 30 MJ ;
- et ce, une cinquantaine de fois par an...

On imagine aisément qu'un revêtement « conventionnel » de tunnel ne pourra satisfaire à ces exigences particulières. C'est pourquoi des solutions techniques ont été imaginées pour répondre à ces besoins spécifiques de résistance aux impacts, au feu et aux ondes de pression et de détente. En complément, une ventilation permettant d'évacuer les gaz chauds de combustion et un système d'extinction des incendies ont du être intégré à la galerie pour la bonne maitrise des essais.

3 Les solutions techniques envisagées

3.1 Les référentiels techniques disponibles

S'agissant d'une rénovation de « tunnel », le premier réflexe a bien évidemment consisté à se rapprocher des référentiels techniques existants. Les nombreux documents mis à disposition par l'AFTES, potentiellement utilisables dans ce contexte, sont rappelés ci-après (Tableau 1).

Tableau 1. Liste des recommandations susceptibles d'être utilisées pour la rénovation de la galerie

Numéro	Titre	Date
GT1R1F1	Caractérisation des massifs rocheux utile à l'étude et à la réalisation des ouvrages souterrains	2003 - n°177
GT7R6F1	La méthode convergence-confinement	2002 - n°170
GT7R4F1	Le choix des paramètres et essais géotechniques utiles à la conception, au dimensionnement et à l'exécution des ouvrages creusés en souterrain	1994 - n°123 SP 99
GT6R4F1	Technologie du Boulonnage	2014 - n°241
GT29R2F1	Compatibilité des recommandations AFTES relatives aux revêtements des tunnels en béton avec les Eurocodes	2007 - n°204 HS4
GT37R1F1	Tunnels routiers : résistance au feu	2008 - n°205 HS4
GT20R1F1	Conception et dimensionnement du béton projeté utilisé en travaux souterrains	2001 - n°164
GT6R3F1	La technologie et la mise en oeuvre du béton projeté renforcé de fibres	1994 - n°126 SP 99
GT6R2F1	La méthode de construction des tunnels avec soutènement immédiat par béton projeté et boulonnage	1979 - n°31 SP 82
GT7R2F1	Réflexions sur les méthodes usuelles de calcul du revêtement des souterrains	1976 - n°14 SP 93
	Recommandations de l'AFTES sur la réhabilitation des ouvrages souterrains	HS3 - 2005

Bien que ces recommandations soient toutes susceptibles d'être utilisées dans le cadre de la rénovation de cette galerie, il n'a pas été possible de les suivre dans leur intégralité compte tenu de l'usage spécifique de cet ouvrage.

A titre d'exemple, on remarquera que les outils permettant de concevoir des tunnels routiers susceptibles de résister au feu ne sont pas adaptés pour des sollicitations thermiques intenses à répétition. Dans un autre registre, les techniques de soutènement par béton projeté, prévues pour fonctionner dans le cadre d'une convergence attendue des parois lors du creusement de galeries ne seront pas sollicitées à leur pleine capacité.

Il a donc été nécessaire d'imaginer des solutions techniques innovantes, permettant d'assurer d'une part la stabilité de la galerie durant les travaux de rénovation et d'autre part le fonctionnement « normal » de l'ouvrage durant les essais d'incendie et d'explosion.

3.2 Le béton ultra haute performance

Dans la phase de conception amont, une recherche bibliographique relative aux technologies innovantes a permis d'identifier un matériau susceptible de répondre aux exigences du cahier des charges décrit en 2.2. Il s'agit du béton ultra-haute performance qui est actuellement utilisé pour protéger les bâtiments sensibles des attaques armées. C'est sur cette idée de base que le Cahier des Clauses Techniques Particulières, permettant de consulter les entreprises de travaux, a été construit.

La phase de pré-dimensionnement a toutefois montré les limites d'utilisation de cette technologie dans le contexte très particulier de cette galerie. L'épaisseur de béton à mettre en œuvre s'élevait à 15 cm (à comparer aux plaques de 2 cm d'épaisseur servant de protection contre les balles). Cela rendait d'une part la mise en œuvre compliquée, du fait des nombreuses plaques amovibles fixées à intervalles réguliers, et posait un problème d'étanchéité au gaz.

Cette solution n'a finalement pas été retenue au profit d'un multi-couche d'acier inoxydable réfractaire et de béton multi-fibré.

3.3 L'acier réfractaire et le béton multi-fibré

La solution technique qui a été déployée dans la galerie Cathédrale consiste en un multi-couche de béton non armé, recouvert d'une couche d'acier inoxydable réfractaire. Cette solution, dont le dimensionnement est explicité dans la partie 4 de cet article, présente plusieurs avantages.

Le premier d'entre eux est une résistance sur le long terme aux effets thermiques qui garantit un maintien des propriétés mécaniques même après de nombreux cycles de chauffe et de refroidissement. La résistance à l'oxydation de l'acier limite également son altération lors des essais. Le second avantage réside dans la capacité du multi-couche à encaisser les impacts de projectiles (dans une certaine mesure) sans générer de décrochement de blocs de roche, et ceci dans le but d'assurer la sécurité des opérateurs lors des opérations de montage/démontage des essais. Le troisième avantage concerne la maintenance qui, même s'il elle reste limitée, nécessite de remplacer certaines plaques d'acier une fois par an par oxydécoupage et resoudage (Figure 4).

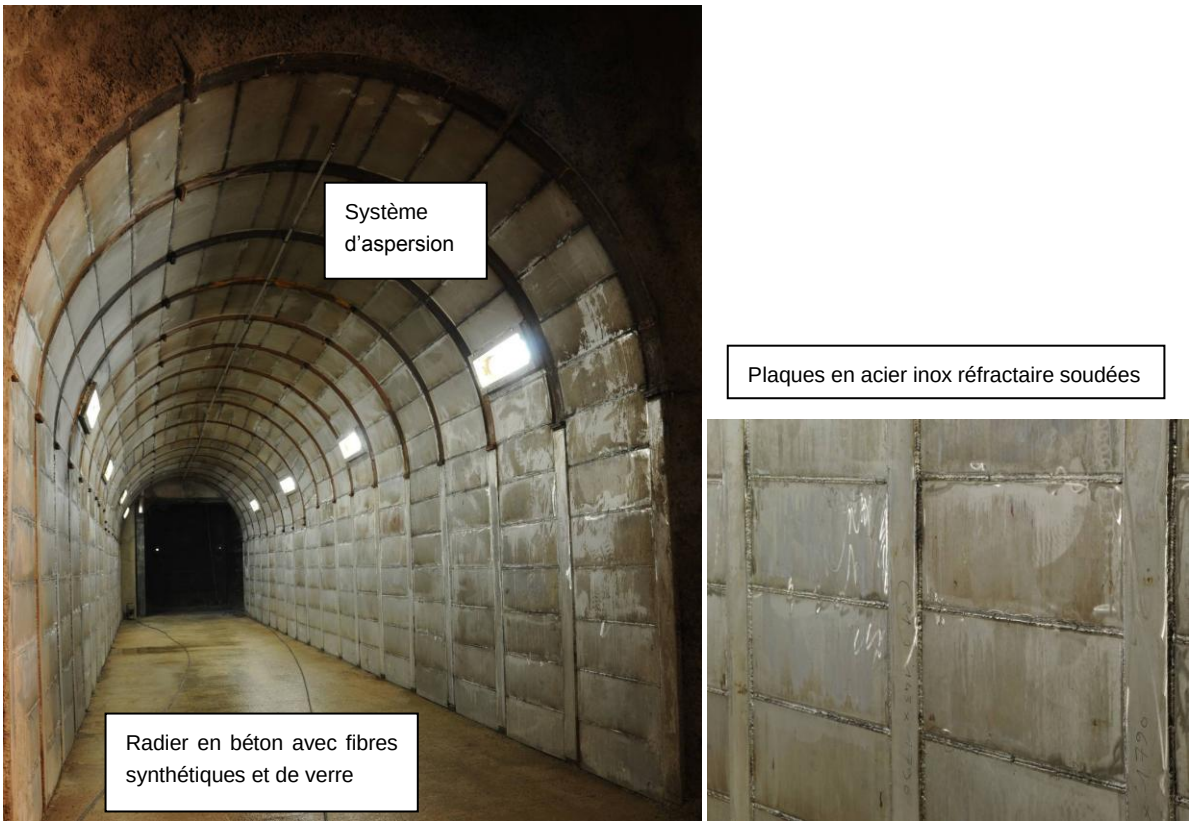

Figure 4 : Vue de la zone d'essais renforcée par plaques d'acier

Une attention particulière a également été portée au radier en béton. En effet, lors d'un incendie, l'eau contenue dans le béton se met à bouillir et tente, inexorablement, de sortir du matériau. Cela produit une écaillage préjudiciable au fonctionnement de l'ouvrage. Il a donc été nécessaire d'adjoindre au béton des fibres synthétiques qui, en fondant la première fois, créent des canaux d'évacuation pour la vapeur d'eau. Pour pallier la destruction des fibres synthétiques et reprendre les efforts de traction sans intégrer de ferraillage dans le béton, des fibres de verre ont du également être mélangées au béton. La quantité optimale de fibres synthétiques et de verre à incorporer a été déterminée sur la base d'essais au feu sur des plaques test. Enfin, l'épaisseur du radier a été calculée de manière a éviter les soulèvements induits par l'onde de dépression lors des explosions.

4 Dimensionnement et Vérification aux impacts du revêtement multicouche

4.1 Hypothèses

Le revêtement de la zone 2 doit être capable de résister à une surpression maximale de 1,2 bar (explosion) et à un feu de 3 MW pendant 30 mn (température de service de 500°C), ainsi qu'à des impacts de fragments métalliques de 300kg ayant une énergie de 30MJ.

La structure du revêtement a été dimensionnée sur la base de 2 types de fragments dénommés « impacteurs », et selon deux cas d'impacts :

- les impacts réguliers : un projectile en matériau composite, de densité 1500 kg/m3, d'une masse de 30 kg, en forme d'ogive à fond sphérique creuse d'épaisseur 30 mm, est projeté avec une énergie cinétique de 5 MJ. Le revêtement de la galerie doit résister sans endommagement à environ 50 chocs. Un renouvellement ponctuel de plaques est envisagé tous les 50 tirs.
- un impact accidentel : un projectile en matériau composite, de densité 1500 kg/m3, d'une masse de 300 kg, en forme d'ogive à fond sphérique creuse d'épaisseur 80 mm, est projeté avec une énergie cinétique de 30 MJ. L'intégrité de l'ensemble de l'ouvrage ne doit pas être remise en cause. Un tel impact impose le remplacement de quelques plaques d'acier et une réparation locale du béton.

Pour ce qui concerne le dimensionnement du radier, une onde de détente (demi-sinusoïde) de 600 mbar pendant 0,5 s constitue l'hypothèse de base.

4.2 Définition de la structure du revêtement

Dans le but d'offrir une solution permettant de répondre à l'ensemble des contraintes, le groupement d'entreprises a proposé un complexe de revêtement de type « souple » (Figure 5) faisant participer l'élasticité du terrain encaissant. Le complexe est constitué (depuis l'extrados vers l'intrados) :

- du terrain encaissant ;
- d'un béton de classe C30/37 XA1 XC4 composé avec un ciment de type CEM III ;
- d'un premier revêtement composé de tôles plates en acier type S235 épaisseur 6mm soudées entre des profilés de type HEB140 servant de coffrage perdu pour le béton de remplissage ;
- d'un second revêtement composé de tôles plates en acier réfractaire à 600°C type SA 387 GR épaisseur 15mm soudées entre les ailes des profilés de type HEB 140.

La mise en œuvre de ce complexe multi-couches a nécessité de nombreuses opérations, ainsi :

- les tôles des revêtements métalliques ont été préalablement cintrées au profil de la galerie afin d'assurer un plaquage du second sur le premier et ainsi de s'affranchir d'un effet thermique de type « bilame » lors de la montée en température du complexe ;
- les tôles du revêtement réfractaire ont été soudées entre elles sur tout leur pourtour avec un métal d'apport de composition réfractaire ;
- les piédroits des profilés de type HEB 140 ont été également revêtus de tôles en inox réfractaires afin d'éviter toute dilatation différentielle entre les différentes nuances d'acier et ainsi protéger la zone d'impact ;
- les blocs d'éclairage ont été dimensionnés de façon à reprendre le gradient thermique dû à l'intensité du feu. Chaque luminaire est intégré dans un caisson, conçu par le groupement, fabriqué sur mesure, et composé de tôles en inox réfractaire et protégé par une vitre de type Pyrex de 40mm d'épaisseur.

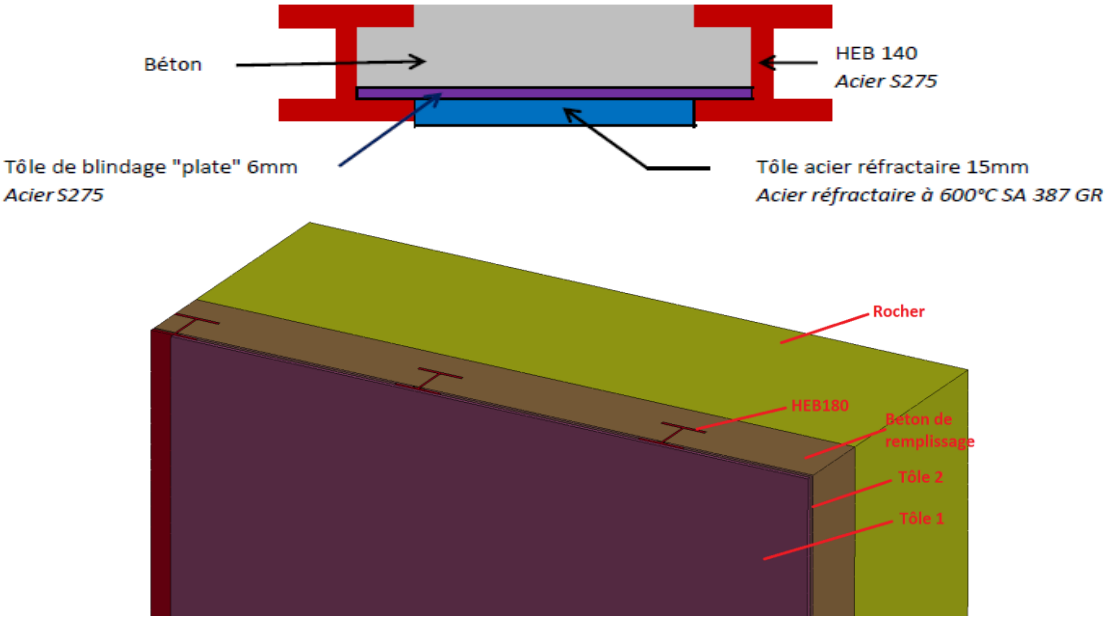

Figure 5 : Coupe du complexe de revêtement et Vue 3D

4.3 Modélisation dynamique du comportement du complexe

Pour vérifier le comportement du complexe envisagé sous actions dynamiques, le groupement s'est rapproché du bureau d'étude spécialisé Alyotech Technologies. L'étude menée a été réalisée par simulation numérique par la méthode des éléments finis au moyen du logiciel LS-DYNA.

Afin de représenter convenablement le comportement du béton et de l'acier lors de l'impact du fragment composite, une méthode disponible dans LS-DYNA, appelée SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) fut utilisée. C'est une méthode particulaire dite « meshfree » qui autorise de très larges déformations.

La définition du complexe a nécessité de multiples itérations sur les types de matériaux constituant le complexe, la réaction du rocher encaissant et les contraintes de rupture du matériau composant les impacteurs. Cette conception a nécessité deux mois de travail afin d'obtenir des résultats satisfaisants.

4.3.1 Propriétés des matériaux

La roche est assimilée à un matériau purement élastique de module d'Young 5 Gpa.

Les propriétés des tôles et profilés en acier réfractaire sont regroupées dans le tableau 2. Celles des impacteurs figurent dans le tableau 3.

Tableau 2. Caractéristiques des matériaux métalliques composants le complexe

Nom	Matériau	Densité kg.m^{-3}	E (GPa)	Rm[1] (MPa)	Rp 0,2% (MPa)	Poisson	A% [%]	Loi de Comportement
Tôle 1	Acier réfractaire SA387 GR 2	7850	210	690	310	0,3	22	Bilinéaire Elasto-plastique
Tôle 2 HEB 140	S275	7800	210	500	275	0.3	19,6	Bilinéaire Elasto-plastique

[1] Rm : Contrainte à la rupture – Rp : Limite d'élasticité – A : Ductilité

Tableau 3. Caractéristiques du matériau composite composant les impacteurs

Densité (g/cm3)	Indice de déformation au cisaillement (%)	Indice de déformation à la compression (%)	Indice de déformation à la traction (%)	Module de cisaillement (GPa)	Module de Young (GPa)	Résistance au cisaillement (MPa)
1,6	1,8	0,8	0,85	5	70	90

4.3.2 Types d'éléments représentant les impacteurs

Afin d'analyser l'influence du type d'éléments représentant l'impacteur, deux modèles ont été créés. Le premier est de type éléments finis et le deuxième en SPH[2] (Hoover, 2006).

Deux géométries ont également été générées pour les impacteurs :

- Pour le cas courant, l'impacteur est une demi-sphère creuse de rayon 40 cm, d'épaisseur 3 cm et de masse 30 Kg (Figure 6).
- Pour le cas exceptionnel, l'impacteur est un projectile cylindrique creux avec un fond de forme hémisphérique de rayon 40 cm et 8 cm d'épaisseur. La masse du fond est de 50 kg, celle du projectile complet (avec la partie cylindrique qui reste solidaire du fond) est de 300 kg.

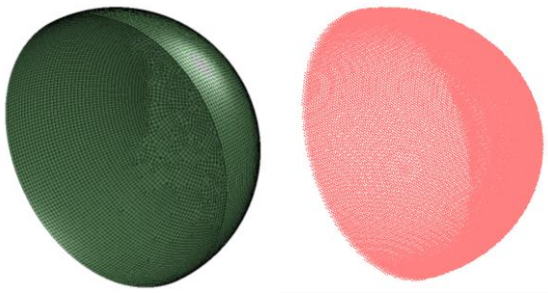

Figure 6 : Impacteur de 30 kg de type Eléments finis et SPH

4.3.3 Les cas de calcul étudiés

Les calculs sont réalisés sur une durée de simulation d'au moins 1 ms. Cette durée est suffisamment longue pour observer des valeurs de sollicitation maximale dans la structure. Les cas de calcul retenus pour le dimensionnement sont résumés ci après. Ils sont au nombre de 6 :

- Les calculs 1 et 2 correspondent au cas du petit impacteur de 30 kg avec, soit 12, soit 30 cm de béton.
- Les calculs 3 et 4 correspondent au cas de l'impacteur exceptionnel (300 kg) avec, soit 12, soit 30 cm de béton.
- Les calculs 5 et 6 sont identiques aux modélisations 3 et 4, avec des hypothèses géotechniques différentes concernant la roche.

4.4 Résultats

Les résultats montrent (Figure 8) :

- une légère intrusion du petit impacteur dans le complexe sans générer de rupture de la couche d'acier ;

[2] SPH : Smoothed Particle Hydrodynamics : Méthode de calcul pour simuler les flux de fluide.

- une importante intrusion du gros impacteur dans le complexe, générant une rupture. Cela imposera le remplacement des tôles en acier à cet endroit ; remplacement facilité par la conception en tôles soudées.

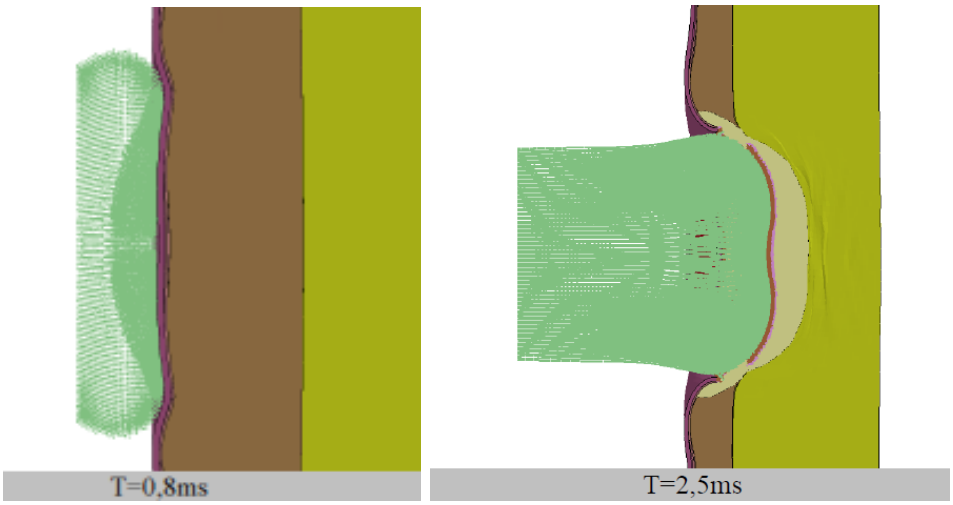

Figure 8 : Exemples de modélisation dynamique du petit impacteur (cas standard) et du gros impacteur (Cas extrême)

5 Conclusion

La rénovation de la galerie Cathédrale du Laboratoire d'Essais à Grande Echelle de l'INERIS a imposé le déploiement d'outils de conception et de moyens techniques inhabituels. En effet, les conditions d'utilisation de l'ouvrage sont telles que les recommandations de l'AFTES classiquement mises en œuvre pour ce type d'ouvrage ne sont plus applicables.

Sur la base de calculs dynamiques d'impacts et d'essais au feu sur des plaques de béton fibrés, il a été possible de concevoir un système de soutènement/revêtement constitué d'un multi-couche de béton recouvert d'une épaisse plaque d'acier inoxydable réfractaire. Cet ensemble permet ainsi à l'ouvrage de résister à une cinquantaine d'essais d'incendie/explosion entre deux opérations de maintenance.

6 Références

Hoover, W. G. 2006. Smooth Particle Applied Mechanics, World Scientific.

Recommandations de l'AFTES : GT1R1F1 – GT6R2F1 - GT6R3F1 - GT6R4F1 – GT7R2F1 - GT7R4F1 - GT7R6F1 – GT20R1F1 - GT29R2F1 – GT37R1F1 (citées explicitement dans le corps du texte)