

21. TGV Paris Genève: le plus grand chantier français de filets de protection contre les chutes de blocs

par

Hugues FOLTZER¹

Résumé.—FOLTZER H., 2013. TGV Paris Genève: le plus grand chantier français de filets de protection contre les chutes de blocs. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 263-276.

Cet article présente les aléas naturels auxquels est soumise la ligne de chemin de fer de Bourg en-Bresse à Bellegarde-sur-Valserine. Le passage du statut de ligne d'intérêt local à la liaison Paris-Genève a nécessité la reconsidération des risques. Suite à l'étude de projet menée par BG Ingénieurs Conseils en 2004, de très importantes mesures de protection ont été mises en œuvre entre 2006 et 2009 dans le cadre de la modernisation de la ligne. Des techniques variées ont été utilisées afin de réduire le risque à un niveau faible, compatible avec l'exploitation commerciale actuelle. Après la route du littoral sur l'île de la Réunion, il s'agit du plus important chantier de protection contre les chutes de pierres et de blocs en France.

Mots clés: pierre, bloc, éboulement, danger, risque, filet.

INTRODUCTION

Depuis le 12 décembre 2010, le TGV assurant la liaison Paris-Genève emprunte la ligne de Bourg-en-Bresse à Bellegarde-sur-Valserine. Surnommée «ligne de Carpates» ou «ligne du Haut Bugey», celle-ci constitue une alternative plus courte à la ligne passant par Ambérieu et Culoz, utilisée jusqu'à cette date pour relier les deux métropoles (figure 1).

En raison de son exposition aux chutes de pierres et de blocs, la ligne a bénéficié lors de sa modernisation entre 2006 et 2010 d'importants travaux de protection. Cet article présente les aléas naturels auxquels est exposée la ligne, le projet des ouvrages de protection, ainsi que les ouvrages qui ont été exécutés.

¹BG Ingénieurs Conseils, Lausanne, Suisse; tél.: +41 (0)21 618 11 11.
E-mail: hugues.foltzer@bg-21.com



Figure 1.–Situation générale, BG / Hugues Foltzer d'après un document RFF.

PRÉSENTATION DE LA LIGNE DE BOURG-EN-BRESSE À BELLEGARDE-SUR-VALSERINE

La ligne Bourg–Bellegarde a été construite entre 1872 et 1882 (CARMELLE & PONT-CARMELLE 2010). Partant de Bourg-en-Bresse, elle traverse les paysages vallonnés de la Bresse, puis le Revermont. L'Ain est franchi par le majestueux viaduc de Cize-Bolozon, avant que le tracé ne s'attaque au chaînon montagneux du Berthiand. Après la plaine de l'Oignin entre Nurieux et La Cluse, la ligne pénètre dans la vallée de Nantua qu'elle emprunte jusqu'à Bellegarde.

La ligne Bourg–Bellegarde est caractérisée par un relief montagneux sur près de la moitié des 65 km de son tracé. Trois ensembles se distinguent :

- Le Revermont, situé entre Simandre sur Suran (PK 22,35) et Cize Bolozon (PK 25,06), est traversé par le tunnel de Racouse.
- Le massif du Berthiand, situé entre la station de Cize-Bolozon (PK 25,06) et Nurieux (PK 33,05) est franchi par un tracé serpentant à flanc de montagne et trois tunnels (Bolozon 1, Bolozon 2 et Mornay).
- Entre La Cluse (PK 36,75) et Bellegarde-sur-Valserine (PK 65,09), la ligne chemine principalement en pied de versant, en suivant le tracé naturel de la cluse de Nantua.

LES ALÉAS NATURELS

Généralités

Au niveau du massif du Berthiand et de la cluse de Nantua, la voie est régulièrement dominée par des falaises de calcaire dont la hauteur peut atteindre jusqu'à plus de cent mètres. Elle est exposée aux aléas naturels suivants.

Chutes de pierres (diam. $\leq$ à 50 cm)

Les pierres proviennent des falaises naturelles, ainsi que des parois des déblais créés lors de la construction de la ligne. Environ 13 km de voie sont affectés par les chutes de pierres, avec des fréquences et des intensités très variables (figure 2).

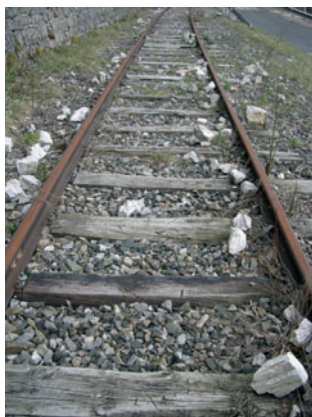


Figure 2.—Pierres sur la voie (Nantua). L'échelle est donnée par l'écartement des rails (1,435 m); photo BG / Emmanuel Rigaud.



Figure 3.—Bloc de 0,5m³ tombé le 26 novembre 2006 (Port); photo BG / Hugues Foltzer.



Figure 5.—Glissement de février 1978 (Le Pradon); photo Pascal Bejui.



Figure 4.—Lave torrentielle de juin 2008 (Nantua); photo BG / Hugues Foltzer.



Figure 6.—Filets de détection (Nantua); photo Pascal Bejui.

Chutes de blocs (diam. $\geq$ à 50 cm)

Les blocs proviennent des falaises naturelles, ainsi que des parois des déblais créés lors de la construction de la ligne. Près de 10 km de voie sont affectés par des chutes de blocs, là encore avec des fréquences et des intensités très variables. Plusieurs événements se sont produits durant les travaux de modernisation de la ligne de chemin de fer (figure 3).

Eboulements

Dans le cas du projet, un événement est considéré comme un éboulement lorsque le volume de matériau mobilisé est égal ou supérieur à 10 m³. Provenant des seules falaises, ils concernent près de 8 km de voie.

Eboulements de masse

Dans le cas du projet, un événement est considéré comme un éboulement de masse à partir d'un volume de 1000 m³. La voie n'est concernée que très localement, notamment au niveau des Doigts du Diable et des Roches d'Au-delà. Le suivi réalisé jusqu'à présent par le CETE de Lyon montre des déplacements très faibles, qui ne sont à ce jour pas inquiétants.

Laves torrentielles

La voie est localement exposée à ce phénomène, par exemple à Nantua. Il s'est d'ailleurs produit à deux reprises au cours des travaux de modernisation de la ligne de chemin de fer (figure 4). Ces laves ne sont pas liées à des cours d'eau à proprement parler. Elles prennent naissance lors de fortes précipitations au niveau des couloirs qui entaillent les falaises et s'alimentent des matériaux prélevés lors de la progression dans les éboulis.

Glissements de terrain

Depuis son ouverture, la ligne Bourg-Bellegarde a subi plusieurs glissements de terrain, dont deux considérés comme majeurs:

- Le 11 avril 1922, aux Neyrolles, la voie est détruite sur une longueur d'environ 200 m par un glissement de terrain d'un volume estimé à plus de 100'000 m³;
- Le 20 février 1978, au Pradon, la voie est détruite sur une longueur d'environ 160 m par un glissement de terrain d'un volume estimé à 20'000 m³ environ (figure 5).

Le présent article ne traite que des chutes de pierres et de blocs rocheux, ainsi que des éboulements, puisqu'il s'agit des aléas qui affectent fréquemment la ligne Bourg-Bellegarde.

LA PROTECTION CONTRE LES RISQUES «NATURELS» JUSQU'EN 2005

Jusqu'à la modernisation de la ligne, c'est-à-dire jusqu'en 2005, la protection contre les chutes de pierres, de blocs et contre les éboulements était essentiellement basée sur des mesures d'exploitation et de détection (figure 6). Les mesures de suppression (purges)

ou les ouvrages de protection (tirants passifs, treillis,...), demeuraient anecdotiques. Ceci d'autant que la circulation baisse sensiblement dès les années 1970, conduisant même à la fermeture de la section La Cluse-Bellegarde en 1990 (quelques autorails par jours jusqu'en 2005 sur la section Bourg-La Cluse) [2].

Bien que de nombreux événements se soient produits depuis l'ouverture de la ligne, aucune victime n'a été recensée en près de 130 années d'exploitation.

Des dégâts sur le matériel roulant, la voie ou ses équipements ont par contre été recensés à plusieurs reprises (rails tordus, carrosserie, déraillements,...). Ces événements «courants» conduisaient à des retards ou à la mise en place d'autocars de substitution.

Pour les événements les plus importants, la circulation a dû être interrompue. Ainsi, suite au glissement des Neyrolles en avril 1922, la circulation n'a pu être rétablie provisoirement que deux mois plus tard. La déviation définitive sera achevée en 1933. Le glissement du Pradon de février 1978 aura quant à lui coupé la voie durant une année.

LA MODERNISATION DE LA LIGNE

L'amélioration de la relation ferroviaire entre Paris et Genève pouvait être réalisée en créant une ligne nouvelle (projet Mâcon-Genève) ou en optimisant les lignes existantes. Plusieurs variantes ont été étudiées entre 1959 et 1997 (CARMELLE & PONT-CARMELLE 2010). L'étude de faisabilité de 1997-1998 a montré qu'à ce jour, seule la modernisation de la ligne de Bourg-en-Bresse à Bellegarde-sur-Valserine était économiquement pertinente.

Cette modernisation passait notamment par la remise à niveau de l'infrastructure (réfection de la plate forme, mise au gabarit des tunnels, réfection et étanchéité des ouvrages d'art, assainissement,...), la création d'un nouveau viaduc, le remplacement complet du ballast et de la voie, ainsi que par l'électrification et la mise en place d'une signalisation et de moyens de communication modernes (BG INGÉNIEURS CONSEILS 2004).

LE PROJET

Une nécessaire actualisation des risques

La conversion de la ligne d'intérêt local en une liaison Paris Genève conduit à une modification considérable des enjeux et de l'exposition aux chutes de pierres et de blocs ainsi qu'aux éboulements. Le risque est par conséquent augmenté de manière importante (BG INGÉNIEURS CONSEILS, 2004).

Désormais, ce sont entre douze et vingt TGV qui empruntent quotidiennement la ligne Bourg-Bellegarde.

Les modifications principales sont les suivantes:

- Augmentation du nombre de personnes exposées (plus de passagers par train);
- Augmentation de la durée d'exposition des personnes et du matériel roulant (plus de trains);

- Modification de l'exposition due au relèvement de la vitesse (distance d'arrêt plus élevée);
- Augmentation de la valeur du matériel roulant (rames TGV et non plus autorails);
- Exposition de nouveaux équipements (électrification, signalisation,...);
- Augmentation des perturbations (correspondances en flux tendu, saturation des lignes) et des pertes d'exploitation en cas de dégradation ou d'interruption de la circulation;
- Diminution de l'acceptation sociale des conséquences des événements aléatoires indésirables.

Les risques créés par les aléas naturels doivent donc être reconsidérés, au vu de la réaffectation de la ligne et de l'évolution du contexte socio-économique.

Le projet

Le projet de modernisation de la ligne a fait l'objet d'une enquête préalable de déclaration d'utilité publique en septembre 2003. La commission d'enquête d'utilité publique a remis ses conclusions et son rapport le 15 janvier 2004. Elle a donné un avis favorable au projet assorti d'une réserve et de six recommandations.

La réserve concerne les risques d'éboulements rocheux le long des lacs de Nantua et de Sylans.

Afin de répondre à cette réserve et en accord avec le ministère de l'Équipement, Réseau Ferré de France (Maître d'Ouvrage) a décidé de s'entourer d'un groupe d'experts (EPFL, CETE, BRGM, SAGEC) dans le domaine visé par cette réserve.

Parmi les missions qui leur ont été confiées, les experts devaient notamment émettre un avis sur les solutions proposées lors de l'étude de projet (PRO) pour les secteurs de Nantua et Sylans.

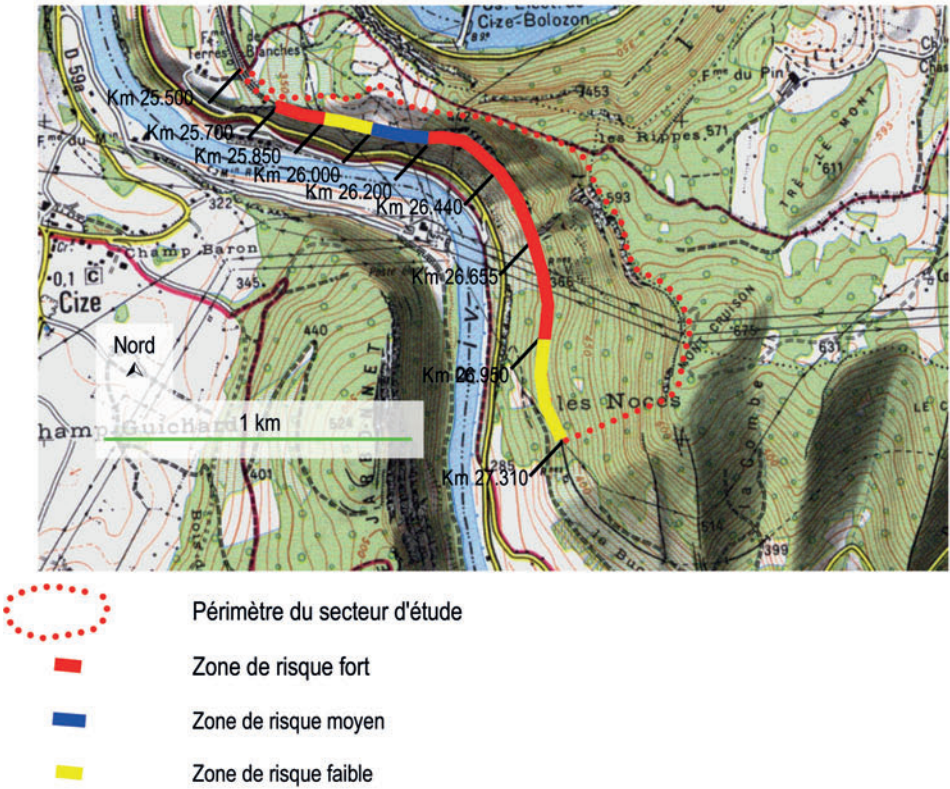
En ce qui concerne les risques d'éboulements rocheux, la direction de l'Ingénierie de la SNCF et Systra (maître d'œuvre de l'opération) ont choisi BG Ingénieurs Conseils pour élaborer l'étude de projet. Celle-ci comporte l'étude du danger et du risque, puis la définition des mesures de protection. En plus des secteurs de Nantua et Sylans, le projet porte sur les secteurs de Bolozon, Mornay, Le Pradon, Les Neyrolles, La Crotte, Chatillon, ainsi que sur plusieurs parois rocheuses de dimensions réduites. Cela correspond à un linéaire de voie de 10 km environ.

Lors du projet, il a été montré que le risque n'était pas homogène sur les tronçons étudiés (BG INGÉNIEURS CONSEILS 2004). En fonction des probabilités de déclenchement et d'atteinte de la voie, le risque variait de faible à fort (figure 7).

Seul un risque faible étant toléré par Réseau Ferré de France, des mesures de protection ont été définies afin de réduire le risque lorsque celui-ci était trop élevé (BG INGÉNIEURS CONSEILS 2004).

Suite à la validation du projet par le Maître d'Ouvrage, BG Ingénieurs Conseils a été chargé de la rédaction des pièces techniques de consultation des entreprises (mission ACT).

Niveaux de risque initial pour les chutes de blocs (sans protections) sur la situation :



Eboulements (sans protections)

Km	25.700 à 25.850	25.850 à 26.000	26.000 à 26.200	26.200 à 26.440	26.440 à 26.655	26.655 à 26.950	26.950 à 27.310
Trajectographie d'étude	-	-		P4	P6	P9	P11
Danger éboulement de masses	≤ 10 m³	(≤ 1 m³)	(≤ 1 m³)	≤ 200 m³	≤ 200 m³	≤ 500 m³	≤ 100 m³
Exposition	forte	forte	forte	forte	forte	forte	forte
Risque/éboulement de masses	fort	faible	faible	fort	fort	fort	faible

Le jaune clair indique un degré de danger très faible.

Figure 7.–Zonage du risque (Bolozon), figure extraite de BG INGÉNIEURS CONSEILS (2004), fond topographique IGN.

LES TRAVAUX

Découpage en lots géographiques

Les travaux de modernisation ont été répartis en plusieurs marchés. Pour les travaux de génie civil d'infrastructure, le projet a été découpé en trois zones géographiques constituant un marché propre pour chacune d'entre elles:

- La partie occidentale du projet (de Bourg-en-Bresse au viaduc de Cize-Bolozon) relève du lot 1;

- La partie centrale du projet (du viaduc de Cize-Bolozon à Brion) relève du lot 2;

- La partie orientale du projet (de Brion à Bellegarde-sur-Valserine) relève du lot 3;

A la demande du groupement de maîtrise d'oeuvre travaux Inexia + Systra, BG Ingénieurs Conseils a assuré les missions de contrôle des documents d'exécution (VISA), de direction des travaux de protection (DET), puis d'assistance aux opérations de réception (AOR).

Pour les études d'exécution et travaux de pose des filets de détection (marché d'équipements ferroviaires), BG Ingénieurs Conseils n'a participé qu'à la mission VISA, complétée par des adaptations de projet.

Adaptations du projet au cours des travaux

Les versants et affleurements rocheux dominant la voie sont recouverts d'une végétation très dense, constituée principalement de buis. Malheureusement, en raison notamment du programme global de l'opération, aucun débroussaillage n'a pu être réalisé pour les études de projet.

Le débroussaillage ayant été effectué au démarrage des travaux, la perception des aléas a localement changé (figure 8). Des adaptations de projet ont ainsi été nécessaires, généralement sous la forme d'une augmentation des quantités des surfaces de treillis, du nombre de tirants passifs et de filets plaqués.

Cependant, sur certains secteurs, les débroussaillages associés à des inspections particulièrement poussées des versants et des affleurements ont au contraire permis la diminution des longueurs de filets de protection et l'abaissement de la classe des filets de protection.

Compléments d'étude

Au cours des travaux, de nouveaux affleurements rocheux potentiellement dangereux ont été découverts par la maîtrise d'œuvre. Il a été demandé à BG Ingénieurs Conseils d'étudier ces nouvelles zones, qui n'avaient pas été identifiées lors de l'Avant Projet Sommaire de 2000. Le linéaire supplémentaire de voie concernée se monte à 3,5 km, ce qui porte à plus de 13 km la longueur de versant à étudier, répartis en 75 zones.



Figure 8.—Affleurements après débroussaillage (Chatillon);
photo BG / Hugues Foltzer.



Figure 9.—Purges manuelles et mécaniques (Chatillon);
photo BG / Hugues Foltzer.



Figure 10.—Réalisation de tirants passifs (Bolozon);
photo BG / Hugues Foltzer.

LES MESURES DE PROTECTION

Supprimer les volumes les plus instables

Les mesures de suppression suivantes ont été mises en œuvre en ce qui concerne les volumes les plus instables (figure 9):

- Purges manuelles,
- Purges mécaniques (pelle mécanique, vérin, coussin,...)
- Purges à l'explosif

Empêcher le déclenchement

Les mesures de protection suivantes ont été mises en œuvre dans le but d'empêcher la mobilisation de pierres et de blocs:

- Plus de 4'900 tirants passifs (figure 10);
- 24 tirants actifs monobarres ascendants et isolés électriquement (prototypes conçus par la société DSI selon le cahier des charges de BG Ingénieurs Conseils);
- Filets plaqués de câbles ou à anneaux;
- Treillis (grillage) double torsion plaqué;
- Treillis haute résistance plaqué;
- Butons et contreforts en béton armé.

Canaliser ou arrêter la propagation

Les mesures de protection suivantes ont été mises en œuvre dans le but de canaliser ou arrêter la propagation de pierres et de blocs:

- Plus de 60'000 m² de treillis (grillage) double torsion pendus;
- Avaloirs grillagés;
- Filets de câbles pendus;
- Fossés et merlons;
- 7,985 km de filets de protection (écrans pare blocs) classe 1 à 8 (figure 11).

Suivre l'évolution de l'aléa

L'instrumentation suivante a été mise en œuvre:

- Piézomètres en versant (y compris dans des éboulis);
- Fissuromètres (figure 12);
- Prismes topographiques;
- Cellules de mesure de force (tirants actifs).

Détecter un événement

Les anciens filets de détection (alerte visuelle par des torches à flamme rouge en début de zone dangereuse) ont été supprimés. Ils ont été remplacés par de nouveaux filets. Le

sectionnement des fils agit directement sur la signalisation et transmet immédiatement l'information au gestionnaire.

Plus de 8,5 km de filets de détection ont été mis en œuvre, dont 500 m horizontalement au dessus de la voie (figure 13).



Figure 11.—Filet de protection de 3000 kJ (Nantua); photo BG / Hugues Foltzer.



Figure 13.—Filets de détection verticaux et horizontaux (La Crotte); photo BG / Hugues Foltzer.



Figure 12.—Pose d'un fissuromètre (Bolozon); photo BG / Hugues Foltzer.

QUALITÉ DES OUVRAGES

Généralités

La qualité des ouvrages ne repose pas que sur leur conception et leur dimensionnement. Ce chantier a confirmé que les fournitures utilisées et leur mise en œuvre revêtent une importance considérable. Il en va non seulement de la résistance, mais aussi de la pérennité des ouvrages.

Fournitures

Les travaux de protection contre les chutes de pierres et de blocs se caractérisent par l'emploi de produits manufacturés (câbles, filets, poteaux, treillis,...) qui sont assemblés une fois approvisionnés sur le terrain.

Le choix judicieux des exigences (responsabilité du concepteur du projet), puis des fournitures (responsabilité de l'entrepreneur) constituent ainsi des actes décisifs en faveur de la qualité des ouvrages.

En raison de l'ampleur des travaux, la protection de la ligne de Bourg-en-Bresse à Bellegarde-sur-Valserine a nécessité des quantités inhabituellement importantes de fournitures. Ainsi, l'évolution de la manufacture et des circuits de fournitures sur trois années de travaux a exigé la révision de la traçabilité des fournitures (figure 14) et leur contrôle par essais mécaniques et métallurgiques.

Ces notions, jusqu'ici peu considérées, ont anticipé le guide d'agrément technique européen ETAG 27 EOTA (2008).

Mise en œuvre

En dehors des fournitures, la qualité et la pérennité des ouvrages sont grandement conditionnées par la mise en œuvre.

Une proportion importante des ouvrages est constituée de kits ou systèmes (filets de protection, revêtements de treillis). Le travail de l'entrepreneur consiste donc principalement à réaliser la fondation de ces systèmes (tirants passifs), puis leur montage. Le dimensionnement des fondations est réalisé sur la base de plusieurs essais d'arrachement par secteur.

La vérification de la conformité du montage des filets de protection s'effectue visuellement sur la base des notices techniques du concepteur et des règles de l'art. Des contrôles mécaniques par échantillonnage sont également réalisés (couples de serrages,...).

Le contrôle de la réalisation des fondations est plus délicat compte tenu de la variabilité spatiale des propriétés mécaniques des terrains, une grande vigilance a été nécessaire tant de la part de l'entrepreneur que de la direction des travaux.

La quantité importante de tests de traction imposés par BG Ingénieurs Conseils a permis d'identifier des résistances anormales des ancrages des filets de protection sur trois grands secteurs géographiques (figure 15).

La résistance des ouvrages ne pouvant être assurée sur ces trois secteurs, il a fallu en cours de chantier remédier à cette situation en :

- Ciblant les zones problématiques grâce à la multiplication des tests de traction et l'interprétation des fiches de forage;
- Doubant une cinquantaine d'ancrages (Nantua et les Neyrolles);
- Remplaçant purement et simplement une soixantaine d'ancrages (Sylans). A cette occasion, l'entreprise GTS a proposé l'utilisation de filler pour augmenter la viscosité du coulis de ciment et éviter ainsi l'usage des chaussettes géotextiles.

Ces mesures ont été validées par de nouveaux tests de traction, réalisés avec un dispositif d'appui répondant aux exigences de BG Ingénieurs conseils. La stratégie adoptée a permis de limiter de manière importante le nombre d'ancrages à doubler et à remplacer. Elle a finalement permis de limiter les conséquences sur le chantier.



Figure 14.—Marquage des câbles façonnés (Sylans);
photo BG / Hugues Foltzer.



Figure 15.—Test de traction sur ancrage de filet 3000 kJ (Sylans);
photo BG / Hugues Foltzer.

CONCLUSION

Du fait de son environnement montagneux, la ligne de chemin de fer de Bourg-en-Bresse à Bellegarde-sur-Valserine est exposée à plusieurs types de dangers gravitaires. Les chutes de pierres et de blocs constituent les aléas les plus fréquents. Le projet mené en 2004 et 2005 a montré que certains tronçons étaient exposés à un risque moyen à élevé. Seul un risque faible étant toléré par RFF, des ouvrages de protection ont été proposés par BG Ingénieurs Conseils. La construction de ces ouvrages entre 2006 et 2009 a permis de réduire le risque à un niveau faible, compatible avec les nouveaux enjeux de cette ligne, élément-clé de la liaison Paris-Genève.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier ses collègues Thierry Buchs, Emmanuel Rigaud, Robin Chabloz, Christophe Salot, Cathie Hansmann, Laurent Fournier-Bidoz, Karim Khireche, Grégoire Favre, Michel Mercier et Patricia Biffrare pour leur précieuse aide sur ce projet, ainsi que Pascal Bejui et La Régordane Productions pour la permission d'utiliser certaines photographies.

RÉFÉRENCES

- BG INGENIEURS CONSEILS, (2004). Modernisation de la ligne de Bourg-en-Bresse à Bellegarde-sur-Valserine, dossier PRO, protection contre les éboulements (non publié).
CARMELLE, O., & Pont-CARMELLE V., 2010. La ligne du Haut Bugey.
EOTA (2008). *ETAG 27* "falling rocks protection kit"

LISTE DES ABRÉVIATIONS

- ACT: Assistance pour la passation des Contrats de Travaux
- AOR: Assistance aux Opérations de Réception
- BRGM: Bureau de Recherches Géologiques et Minières
- CETE: Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement
- DET: Direction de l'Exécution du contrat de Travaux
- DSI: Dywidag Systems International
- EPFL: École Polytechnique Fédérale de Lausanne
- ETAG: European Technical Approvals Guidelines
- PK: Point Kilométrique
- PRO: Etudes de PROjet
- RFF: Réseau Ferré de France
- SAGEC: Société d'Audit, Gestion, Expertises et Conseils
- SNCF: Société Nationale des Chemins de Fer
- TGV: Train à Grande Vitesse
- VISA: contrôle des documents d'exécution émis par les entreprises

AUTRES DANGERS

Glissement de terrains

(Articles 22 et 23)

Aléas sismiques et volcaniques

(Articles 24 et 25)