

TRAITEMENT D'UN DEBLAI DE LA LGV EST EUROPEENNE PAR MASQUE AVEC REUTILISATION DES MATERIAUX DU SITE

TREATMENT OF CUTTING FROM THE EASTERN EUROPEAN HIGH SPEED TRAIN LINE PER MASK WITH REUSE OF SITE MATERIALS

Guillaume NEVEU¹, Vincent TALFUMIERE²

¹ SNCF RESEAU – Direction Technique du Réseau, La Plaine Saint Denis, France

² SNCF RESEAU – Direction Technique du Réseau, La Plaine Saint Denis, France

RÉSUMÉ – En mars 2020, un TGV, sur la ligne PARIS-STRASBOURG, déraile suite à un glissement de terrain. Après les réparations d'urgence, des travaux complémentaires ont été nécessaires pour sécuriser le site. Il a été décidé de réaliser des masques poids en réutilisant les matériaux du site traités au liant. Cette solution a permis un gain en extraction de granulat, en circulations de camion, en planning et en coût très significatif.

ABSTRACT – In March 2020, a high-speed train on the PARIS-STRASBOURG line derailed following a landslide. After the emergency repairs, additional work was required to secure the site. It was decided to make weight masks by reusing the site's materials treated with binder. This solution has led to significant savings in terms of aggregate extraction, truck traffic, planning and cost.

1. Introduction

Au matin du 5 mars 2020, à 7h32, un TGV, en provenance de Colmar et se dirigeant vers Paris (sur la voie 2), heurte une masse de terre glissée et déraile prolongeant sa trajectoire sur plus de 1600 mètres, en engageant la voie contiguë (Fig.1). Un seul blessé grave est à déplorer. La cause du déraillement est le heurt du pied du bourrelet d'un glissement du talus adjacent (sur le talus côté Sud) qui s'est produit peu avant le passage du TGV.



Figure 1. Vue aérienne du déblai après le glissement du 5 mars 2020

1.1 Contexte du site

Non loin de la ville de Saverne, l'infrastructure est établie en grand déblai de 25 m de hauteur, l'ouvrage en terre le plus haut et le plus long (environ 1km200) du tronçon terminal de la ligne, dénommé déblai de Lupflenmatt. Il comporte des talus pentés à 2H/1V (27°) et deux bermes intermédiaires de 4m de largeur, équipées de tranchées drainantes de 3 m de profondeur. Les talus inférieurs et intermédiaires sont recouverts d'un masque de protection de 0.75 m d'épaisseur. En plateforme, le drainage est assuré par un collecteur drainant sur toute la longueur du déblai. La pente générale des terrains de recouvrement est du Sud vers le Nord et en allant vers Paris.

L'ouvrage en terre se compose de deux buttes, séparées par un léger talweg, d'une quinzaine de mètres de hauteur côté Ouest et de 25 m de hauteur côté Est.

Le déblai a été taillé dans les formations suivantes :

- Lœss (OE), avec un faciès limoneux, plus ou moins argileux et parfois silto-sableux, d'épaisseur importante, jusqu'à 15 à 16 m environ sur une partie de la butte Est ;
- Marnes silteuses du Domérien (I6), marnes argilo-silteuses à nodules calcaires,
- Marnes du Carixien (I5), marnes et argiles plus ou moins limoneuses gris beige,
- Marnes et argiles du Lotharingien (I4), gris bleu, s'altérant en beige et jaune, à concrétions calcaires et ferrugineuses,

Un niveau de nappe est situé à proximité de la risberme haute, dans les loess, avec des arrivées d'eau ponctuelles pouvant se produire au-dessus.

Le glissement de mars 2020 n'a concerné que les lœss et les marnes du Domérien. Il s'agit d'un des plus gros glissements connus sur une ligne à grande vitesse (proche de 11 000 m³) et le seul ayant engagé le gabarit ferroviaire depuis la mise en service des premières lignes à grande vitesse en 1981. Cet accident s'est produit 3 ans et demi après la mise en service de la ligne et moins de 8 ans après la fin des travaux de terrassement.

1.2 Travaux réalisés en urgence pour la reprise des circulations

Aussitôt la découverte du glissement, SNCF RESEAU a mis tout en œuvre pour reprendre l'exploitation de la ligne ferroviaire dès que la sécurité le permettait. Toutefois, ces travaux ont été retardés par le confinement lors de la pandémie COVID alors que les premiers travaux de terrassement avaient débuté.

Ces travaux de réparation ont consisté à la réalisation d'un masque de reconstitution de 30 000 m³ et se sont déroulés en deux phases entre avril et juin 2020 :

- Phase 1 : déchargement du talus pour accéder aux voies, sécuriser le déblai avec l'évacuation de 14 000 m³ de matériaux,
- Phase 2 : évacuation de 16 000 m³ complémentaires et confortement par mise en œuvre d'un masque en matériaux de carrière, drainants, compactés sur une bêche d'ancrage et reprise des drainages existants avec raccordements des tranchées drainantes au collecteur de plateforme.

La zone traitée a été élargie sur 85m pour être sûr de bien prendre en compte l'ensemble des masses glissées. Il est à noter que durant les phases de terrassement, des suintements conformes aux études ont été constatés à l'interface lœss et marnes du Domérien, proche du niveau de la risberme supérieure.

Les travaux de remise en état des voies ont également débuté en avril pour finir fin juin 2020, avec dépose des 4 kms de voie détériorée, renouvellement des voies par remplacement de 7 000 traverses, de 240 tonnes de rail et 4 000 tonnes de ballast, ainsi que remise aux normes.

Après analyse d'un comité d'experts commandité par SNCF RESEAU, le déblai de Lupflenmatt a été identifié avec une forte incertitude sur la stabilité des talus encadrant la zone du déraillement (côté Sud) et le talus situé sur la voie contiguë (côté Nord). En effet, ces talus sont constitués des mêmes matériaux : les marnes du Domérien. Ainsi, pour permettre la reprise des circulations en sécurité sur le tronçon concerné, des mesures conservatoires ont été mises en place pour traiter le risque de nouvel accident suite à une analyse de risque très poussée, afin d'examiner la stabilité de ces déblais et d'effectuer les travaux confortatifs qui en découleraient. En effet, un délai de plusieurs mois était nécessaire pour :

- Réaliser une campagne de sondages géologiques et d'essais géotechniques, et instrumenter le site en piézomètres et en capteurs de pressions interstitielles (CPI),
- Entreprendre les études de stabilité en propre dans notre bureau d'études,

- Définir les zones éventuelles à traiter et la nature des confortements, pour assurer une stabilité à long terme des talus,
- Réaliser les travaux préventifs de confortement de ces secteurs.

Ces mesures conservatoires consistaient en :

- Limitation temporaire de vitesse (LTV) à 80 km/h (barrière de réduction du risque),
- Système de détection de glissement de terrain sur les talus concernés avec un dispositif de report d'alarme vers le poste de commande de la ligne et émission d'une alerte radio GSM-R dans la cabine du TGV circulant dans la zone équipée (barrière de détection du risque).

Ce dernier dispositif est constitué de capteurs clinométriques. Le système a été adapté en quelques semaines pour pouvoir envoyer une alerte en cas de mouvement d'un capteur et une alarme en cas de mouvement de deux capteurs. Pendant la période où il a été actif, aucune alerte ou alarme liée à des mouvements du talus n'a été émise : la sécurité des trains était assurée.

Ainsi, avec l'ensemble des travaux réalisés en urgence et la mise en place de ces deux barrières (vitesse réduite et capteurs de mouvement), les circulations ferroviaires ont pu reprendre à 80 km/h le 27 septembre 2020 (au lieu de 320 km/h).

2. Reconnaissances géotechniques et diagnostic de stabilité des terrains

2.1. Campagne de reconnaissance

Une campagne de reconnaissance géotechnique et d'instrumentation (de type G1 ES selon la norme NF P 94-500 – novembre 2013) a été réalisée entre mai et octobre 2020 dans la zone du glissement de terrain et sur l'ensemble du déblai, au niveau de la crête de talus et au niveau de la plateforme ferroviaire. L'objectif est d'acquérir les données d'entrée nécessaires (stratification des terrains, caractéristiques mécaniques des terrains et conditions hydrologiques) pour établir le diagnostic du glissement de terrain, pour définir l'état de stabilité des talus adjacents et pour dimensionner les solutions de confortement. Cette campagne a consisté à réaliser côtés Nord et Sud :

- 6 sondages carottés de 20 à 30 m de profondeur,
- Une quinzaine de sondages à la tarière de 10 à 30 m de profondeur,
- 4 piézomètres et poser 20 CPI (toute l'instrumentation est automatisée),
- Une centaine d'essais en laboratoire d'identification GTR complète,
- Une trentaine d'essais triaxiaux CU+u et une trentaine d'essais œdométriques,
- Des essais d'aptitude au traitement à la chaux (2 et 3%) et au ciment (3 et 5%),
- Un diagnostic environnemental de la qualité des sols sur 24 échantillons,

2.2. Interprétation des données et étude de stabilité

Cette campagne de reconnaissance a permis de confirmer le contexte géologique du secteur mais surtout d'affiner précisément la stratification des couches sur le profil en long avec des variations géométriques importantes. Il est mis en évidence une formation de loess en partie supérieure et des argiles du Domérien en partie basse, et localement des marnes noirâtres plastiques en pied de déblai, au début de la butte Est, dans la zone du glissement de terrain. Les paramètres mécaniques des deux couches sont assez similaires, et plus faibles dans la butte Est que la butte Ouest. Au niveau de la butte Est la cohésion effective est comprise entre 7 et 10 kPa environ et l'angle de frottement effectif est de l'ordre de 24°. Une première nappe est présente sur toute l'épaisseur de marnes et une seconde est présente dans les loess de hauteur variable de plusieurs mètres. Les résultats des essais d'aptitude permettent d'envisager un éventuel traitement des matériaux. Cependant, la

nature des liants et le dosage restent à affiner. Le diagnostic environnemental de la qualité des sols identifie uniquement des matériaux conformes en Installation de Stockage de Déchet Inerte (ISDI) et Spécifique (ISDI+).

Ensuite, un diagnostic de stabilité (de type G5 selon la norme NF P 94-500 – novembre 2013) a été réalisé sur la stabilité des talus de l'ensemble du déblai. Les résultats des calculs de stabilité ne sont pas satisfaisants sur une partie de la butte Est. Ils montrent des coefficients globaux de stabilité inférieurs à 1 (Fig. 2). Par conséquent il est nécessaire de conforter le déblai de façon préventive sur 615ml (360 ml côté Nord et 255 ml côté Sud) sur des talus de 8 à 25 m de hauteur.

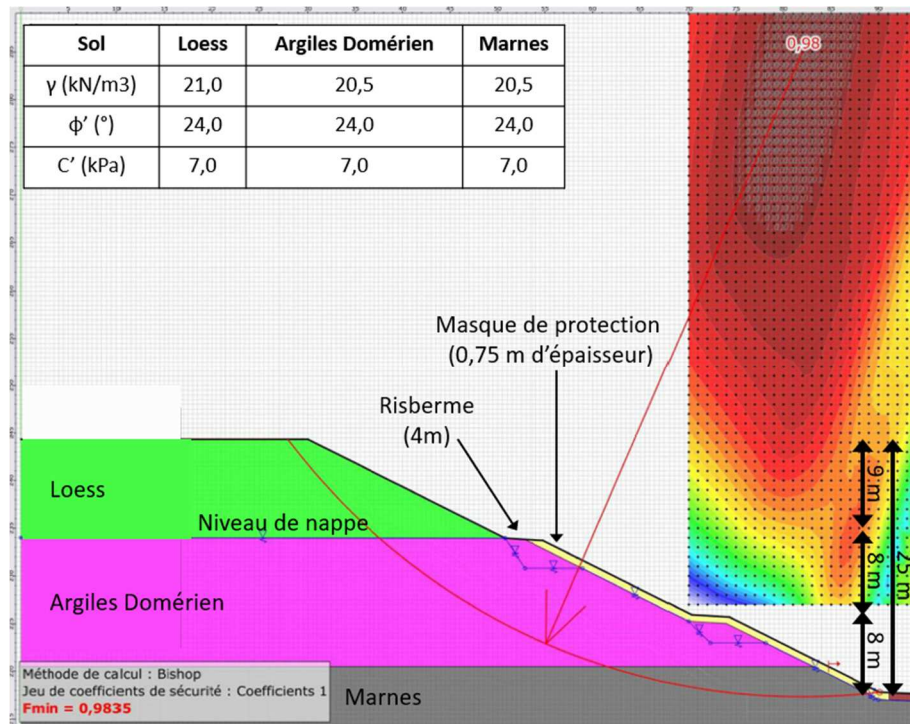


Figure 2. Calcul de stabilité (Talren) côté Sud (V2)

3. Conception du projet

3.1. Etude préliminaire des solutions envisageables

Au stade de l'étude préliminaire plusieurs solutions sont étudiées :

- Retaluter les pentes des talus en passant de 2H/1V à 3H/1V,
- Retaluter les pentes des talus intermédiaires et supérieurs, et réaliser un masque poids ou des éperons drainants sur le talus inférieur,
- Mettre en place des éperons drainants sur tous les niveaux de talus,
- Réaliser un masque poids avec des matériaux d'apport ou traités,
- (Clouer verticalement le talus avec des pieux béton ou des profilés métalliques,

Ces différentes solutions plus ou moins performantes, coûteuses, longues et contraignantes à réaliser peuvent modifier la géométrie actuelle du talus (retalutage), la nature des matériaux du déblai et les conditions hydrauliques (masque ou éperons drainants), ou renforcer le talus (clouage). Compte tenu de la présence de matériaux argileux avec de faibles caractéristiques mécaniques, d'un contexte hydrogéologique défavorable (nappe haute dans le talus), de la nécessité de réaliser les travaux rapidement (éviter l'acquisition de terrain agricole en crête de déblai), la solution par masque en matériaux d'apport ou traités est la plus pertinente.

3.2. Etude géotechnique de conception

Une étude géotechnique de conception (de type G2 PRO selon la norme NF P 94-500 – novembre 2013) a été réalisée pour une solution de confortement par masque composé de matériaux d'apport drainants (augmentation des efforts résistants par des matériaux frottants) ou de matériaux du déblai traités sur site (augmentation des efforts résistants par des matériaux de cohésion plus élevée). Le masque traité est associé à un matelas drainant de 1m d'épaisseur en assise et en face arrière. Le dimensionnement nécessite une bêche d'ancrage pour assurer une bonne assise et éviter les ruptures au grand glissement.

Au final la solution de confortement par masque traité est retenue. Cette dernière est partagée avec les différents acteurs locaux (mairies de Duntzenheim et d'Ingenheim, les propriétaires des terrains agricoles et la chambre d'agriculture). Cette solution a l'avantage de réduire le prélèvement de matériaux d'apport des carrières aux alentours et occasionne moins de trafic de camions sur le réseau routier. Dans le cadre des travaux une aire de traitement et de stockage sera nécessaire sur les emprises agricoles en crête de déblai.

Le projet de confortement sur plus de 600 ml nécessite environ 150 000 m³ de terrassement, dont 100 000 m³ de masque traité (67%) et 50 000 m³ de massif drainant (33%) comprenant le matelas drainant et la bêche d'ancrage. Le volume du confortement est d'environ 400 m³/ml dans la zone de plus grande hauteur du talus (Fig. 3).

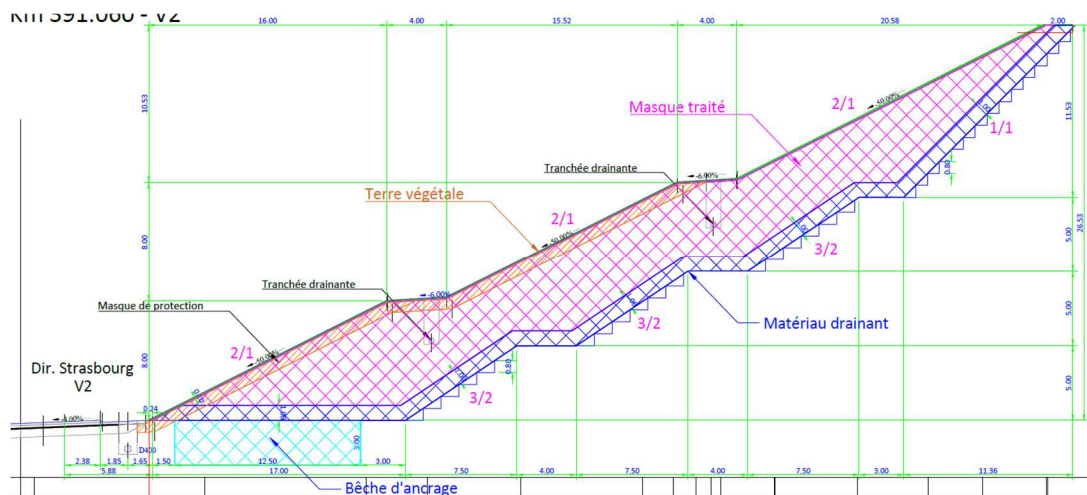


Figure 3. Profil en travers du confortement au km 391.060 côté Sud (V2)

4. Réalisation du projet

4.1. Gestion des déblais et installations de chantier

SNCF a recherché des dépôts sur son foncier, dans un rayon de 5 km, pour réceptionner les déblais excédentaires des terrassements d'environ 50 000 m³. 6 zones, entre 10 000 et 30 000 m³ sont identifiées et proposées au marché de travaux.

En parallèle SNCF a anticipé et entrepris les démarches administratives vis à vis de la chambre d'agriculture et des propriétaires des parcelles agricoles en crête de déblai des deux côtés pour accueillir les installations de chantier sur environ 2,5 hectares de chaque côté. Il a été convenu de séparer les terres végétales agricoles et celles des talus, d'utiliser un lit de paille à la place de géotextile, de mettre en place une couche tampon de matériaux de 1 m d'épaisseur au droit des aires de traitement (10 000 m²), et de décompacter les surfaces d'installation de chantier avant de remettre en place la terre végétale agricole. Toutes ces étapes ont été suivies par un agro-pédologue.

Enfin, dans une démarche d'optimisation des matériaux et de limiter les matériaux d'apport, la terre végétale des talus (32 000 m²) sera décapée, stockée provisoirement puis réutilisée pour recouvrir les talus du masque traité. De même, le masque de protection (18 000 m³) sera décapé et réutilisé dans la mesure du possible dans le massif drainant.

4.2. Marché et planning

Le marché est attribué début avril 2021 à NGE. L'entreprise propose d'évacuer l'excédent des matériaux de déblai dans sa carrière, en contre-voyage lors de l'apport des matériaux granulaires drainants. L'objectif est de terminer les travaux pour mi-décembre 2021. Pour cela l'entreprise utilise 3 à 4 ateliers de terrassement et un atelier de traitement. Chaque atelier de terrassement est composé d'une pelle (type 934) associée à plusieurs tombereaux articulés (type A25 et A30) ainsi qu'un compacteur vibrant (type V2 ou V4) et d'un bouteur (type D6 LGP). L'atelier de traitement est composé d'un épandeur (type Panien), d'un pulvimixeur, d'un compacteur (type V2) et d'une arroseuse (type enfouisseur).

4.3. Etude et suivi géotechniques d'exécution

Des études et suivi géotechniques d'exécution (de type G3 selon la norme NF P 94-500 – novembre 2013) ont été réalisés à partir de mi-avril 2021 par l'entreprise pour affiner les choix et les dosages des liants. Pour cela une dizaine de prélèvements a été réalisé dans les talus, puis des essais en laboratoire ont été effectués : Proctor, résistance à la compression simple (Rc), résistance en traction indirecte et module d'élasticité (Rtb+E), indice de portance immédiate et indice portant californien après immersion (IPI/CBRi), gonflement volumique (Gv), triaxiaux consolidés non drainés (CU+u) naturel, +3 et 7 jours de maturation, délai de maniabilité). Compte tenu de la nature des matériaux argileux, de la technique de traitement de stock, du délai de maniabilité des matériaux, de la performance mécanique visée, et de l'expérience de l'entreprise, il a été retenu de faire un prétraitement de 1.5% de chaux vive CL90 (8 kg/m²) au moins 24h avant le traitement de 4% au Liant Hydraulique Routier (LHR) Calcia Ligex FPL1 (21 kg/m²).

4.4. Phasage du chantier de terrassement

Le phasage des terrassements a été construit avec l'entreprise pour éviter l'apparition de glissement de terrain pendant le chantier en limitant l'ouverture du déblai sur une trop grande longueur, tout en permettant de réaliser des rampes d'accès de grande hauteur et d'optimiser les terrassements. Par ailleurs, les terrassements ont été réalisés sous circulations ferroviaires à 80 km/h tout en maintenant le système de détection de glissement de terrain, car la sécurité du chantier reste primordiale pour l'entreprise et pour SNCF.

Ainsi le chantier a été découpé en 5 tronçons et le phasage a été le suivant :

- Décharger les talus supérieurs et intermédiaires avec une pente de 7H/4V,
- Terrasser la partie basse du talus par plots de 20 à 30 ml,
- Terrasser et remblayer la bêche d'ancrage par plots de 5 ml,
- Remblayer les plots en partie basse en matériaux d'apport drainants sur 1 m d'épaisseur et en matériaux traités, puis réaliser le plot suivant,
- Remblayer en grand les talus intermédiaires et supérieurs,
- Végétaliser et ensemercer l'ensemble des rampants de talus.

4.5. Réalisation des terrassements

Les terrassements se sont déroulés de mai à novembre 2023 (Fig. 4, 5 et 6). Les premiers déblais ont servi à réaliser le matelas tampon de 1m d'épaisseur au droit des aires de traitement chacune. Ensuite les opérations suivantes ont été réalisées :

- Régaler les matériaux extraits du déblai sur l'aire de traitement,
- Humidifier si nécessaire les matériaux pour obtenir la bonne teneur en eau,
- Incorporer le liant de 1.5% de chaux vive CL 90 ou de 4% de LHR Calcia Ligex FPL1,
- Malaxer le matériau et le liant sur une épaisseur de 30 cm environ,
- Reprendre le matériau qui présente une mouture fine et des nouvelles caractéristiques mécaniques,
- Régaler le matériau traité dans la zone de remblaiement sur une épaisseur de 20 à 30 cm environ, puis compacter la couche.

Les conditions climatiques ont été très variables et ont impacté le bon déroulement et le rendement du chantier, avec environ 6 semaines d'arrêt pour intempéries (précipitations et gel). Au début du chantier les rendements étaient de l'ordre de 600 à 1000 m³/j pour remblayer la partie basse du déblai (avec des plots de 20 à 30 ml), puis ont progressivement augmenté, pour atteindre 2000 à 2500 m³/j pour réaliser la partie haute du déblai (avec des longueurs de remblaiement plus importantes et un atelier de terrassement supplémentaire).



Figure 4 Photo du chantier le 01/09/2021



Figure 5. Photo du chantier le 01/09/2021



Figure 6. Vue aérienne du chantier le 02/09/2021

4.6. Contrôles des terrassements

Des contrôles ont été réalisés sur les terrassements tout au long du chantier par l'entreprise et par un bureau d'études extérieur dans le cadre d'une mission de supervision géotechnique du suivi d'exécution (de type G4 selon la norme NF P 94-500 – novembre 2013). Ces contrôles ont été effectués à l'extraction des matériaux, pendant le traitement des matériaux et pendant la mise en œuvre en remblai dans le confortement. Ils ont principalement consisté à réaliser des essais d'identification, IPI/CBRi (pré et post immersion), d'aptitude au traitement, de réactivité, de teneur en eau, au pénétromètre dynamique et à la plaque. L'objectif était de vérifier l'efficacité du traitement pour atteindre les performances mécaniques des matériaux et garantir la stabilité du confortement.

Enfin, des sondages carottés ont été effectués dans le confortement pour contrôler l'aspect et l'homogénéité du matériau traité, et pour réaliser des essais de compression et de cisaillement pour confirmer les caractéristiques mécaniques des matériaux en place. Les résultats sont satisfaisants et sont supérieurs à 1 MPa pour la résistance à la compression (RC), 15 kPa pour la cohésion effective (C') et 24° pour l'angle de frottement effectif (ϕ').

5. Conclusions

Après le déraillement du TGV le 5 mars 2020, d'importants moyens ont été mis en œuvre pour rétablir la situation, avec une première phase de travaux d'urgence en 2020 pour reprendre les circulations ferroviaires mais en mode dégradé, puis une seconde phase, préventive en 2021 pour pérenniser la stabilité des talus et rétablir la vitesse nominale de la ligne à 320 km/h, le 12 décembre 2021, au droit de ce grand déblai de Lupflenmatt.

Cette seconde phase de travaux a consisté à réaliser un masque poids sur 615ml environ représentant 150 000 m³ de terrassement, dont 100 000 m³ ont été traités aux liants (environ 10 000 t) sur site puis réutilisés dans le confortement. Cette technique peu utilisée en régénération à SNCF a permis de réduire de façon considérable la rotation de camions et le prélèvement de ressources dans la région, les nuisances pour les riverains et de diminuer le coût financier du projet par rapport à un masque poids en matériaux d'apport.

6. Références bibliographiques

- Neveu G., Talfumière V. (2022). Confortement d'un déblai ferroviaire de grande hauteur sur la LGV EST EUROPÉENNE. *Revue Géologues*, n°215, pp. 26-37.
- Talfumière V. (2019). 40 ans de retour d'expérience sur les ouvrages en terre des LGV. Journée technique CFBR-CFMS-SPTF 2019, Villeurbanne.
- Talfumière V. (2016). Maintenance des ouvrages en terre sur le réseau ferré national. *Revue Géologues*, n°188.
- LCPC, SETRA (2000). Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques, application à la réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique.
- LCPC, SETRA (2000). Réalisation des remblais et des couches de forme, fascicules I et II. Guide technique.