

CONCEPTION-RÉALISATION DE CONFORTEMENTS DE GLISSEMENTS SUR CHANTIER D'URGENCE : REX

DESIGN-EXECUTION FOR SLOPSLIDES EMERGENCY WORKS : FEEDBACK

Maxime SOUDÉ¹, Nicolas VILLARD²

¹ NGE FONDATIONS, Saint-Priest (69), France

² NGE FONDATIONS, Grenoble (38), France

RÉSUMÉ – Les chantiers ferroviaires de Sèvres, des brèches routières de la Roya ou de Fontan ont en commun d'être très difficiles d'accès, avec peu de maîtrise géotechnique préalable et dans un contexte d'urgence et de péril. Aux côtés des départements, de la SNCF et du CEREMA, NGE FONDATIONS fut sollicitée pour des missions de conception/réalisation d'ouvrages de confortement dont on partage le retour d'expérience.

ABSTRACT – *Slopeslides works in Sèvres and Fontan (Railway) or in Roya (Roads) have the following common points: difficult access to sites, not enough geotechnical characterizations and emergency context. Along with Department, SNCF and CEREMA, NGE FONDATIONS was asked to perform design-execution of slopes reinforcement projects. A feedback is given as following.*

1. Introduction

Entre 2020 et 2021 sont survenus deux épisodes majeurs que furent l'arrêt national des activités du BTP lors du premier confinement, ainsi que les ravages engendrés par la tempête Alex dans le département des Alpes-Maritimes. Dans le même temps, plusieurs infrastructures furent paralysées par des glissements de terrain. Compte tenu du caractère d'urgence de restaurer la mobilité ou l'accès à des zones enclavées, NGE Fondations fut associée à des missions de conception-réalisation illustrées au travers de trois projets d'ampleur présentés dans cet article :

- le glissement de terrain SNCF en gare de SEVRES-VILLE D'AVRAY, affectant la mobilité du personnel prioritaire mobilisé lors du 1er confinement de mars 2020 (Figure 1) ;
- une vingtaine de brèches de la vallée de la ROYA ayant coupé les voies d'accès par la seule route à ces mêmes zones (Figure 2) ;
- le mur à arcatures de FONTAN (également dans la vallée de la ROYA) fragilisé par un glissement de terrain aval, dernière voie d'acheminement des habitants et des matériaux auprès des zones enclavées par la tempête Alex (Figure 3).

Cet article a ainsi pour but de proposer un retour d'expérience sur ces opérations de conception/réalisation, telles qu'elles ont pu être abordées du point de vue des études techniques. Les délais ne permettant pas le déroulement classique des missions géotechniques (G5, G2-AVP, G2-PRO puis G3 selon NF P94-500), toutes les analyses ainsi que les préconisations de ces missions ont ainsi été traités simultanément. C'est pourquoi sont présentés quatre thèmes animant toute la durée des études : la Géométrie, la Géotechnique, l'Ouvrage et la Modélisation, chacun reposant sur l'interaction permanente de plusieurs expertises.



Figure 1. Chantier de SEVRES VILLE-D'AVRAY (avant après)



Figure 2. Chantier d'une brèche type dans la ROYA (Travaux en cours)

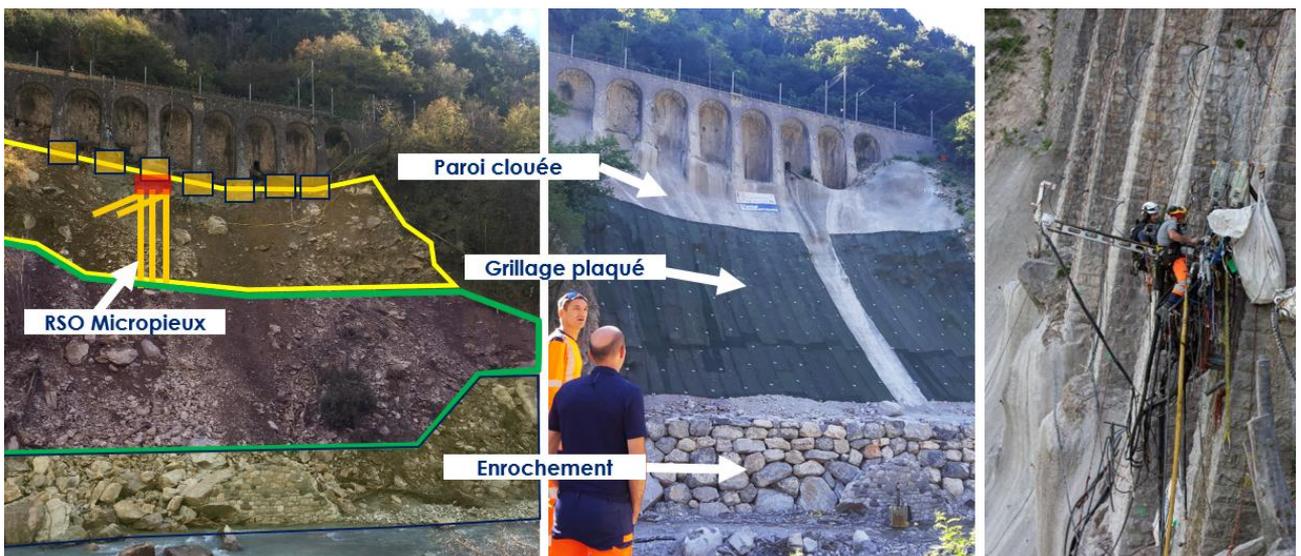


Figure 3. Chantier du mur à arcatures de FONTAN (Avant, après et travaux sur cordes)

2. Enjeux liés à la géométrie

Les accès, les dénivelés, les pentes de talus ainsi que les désordres observés permettent une première lecture qualitative de l'état d'instabilité d'un site. Ces éléments donnent des indications quant aux mécanismes de ruine à conforter, définissent le type et le nombre d'ouvrages à réaliser. Dans un cadre d'urgence, les éléments issus cette seule lecture géométrique définissent les moyens matériels les plus adaptés à déployer immédiatement.

2.1 L'accès à la zone de chantier

Pour chaque zone de chantier, les voies d'accès ont été tout autant impactées par les intempéries que les talus à conforter eux-mêmes. A Sèvres, la seule route disponible en amont était neutralisée et la voie ferrée en contrebas ensevelie. Dans la vallée de la Roya, les brèches étaient desservies en enfilade par une seule route rendant les passages à gué indispensables. Quant à Fontan, seule la voie ferrée passant sur le mur à arcatures permettait un accès au versant. Le recours à des engins légers et agiles était donc indispensable, non seulement pour intervenir sur des secteurs pentus et instables, mais également pour emprunter les accès à ces derniers. Les pelles rail-route, les pelles araignée ou encore les mâts de forage sur cordes ne constituaient pas forcément les moyens mécanisés les plus adaptés à la taille des ouvrages à réaliser (à contrario du wagon grue Kirow facilitant une partie de la manutention à Sèvres), mais ils étaient les seuls à pouvoir intervenir et évoluer sur site.

2.2 La complexité inhérente à la géométrie de la solution

Chaque solution de clouage devait être suffisamment rapide à réaliser pour empêcher l'accélération des déplacements dans des zones de talus où les ruptures n'étaient pas achevées (Terres en aval d'une maison, mouvements d'une pile de pont, effondrement des flancs de la lentille de glissement, nouvelle rupture de la butée de pied...). Dans le même temps, chaque clou ou micropieu réalisé devait s'inscrire autant que possible dans une logique de confortement globale et cohérente. Par exemple à Sèvres, chaque soutènement était conçu pour parer à une urgence de conforter un mécanisme de ruine local. Toutefois, un second calcul venait systématiquement éprouver la pertinence de réaliser certaines inclusions vis-à-vis de différents scénarios futurs : (Prise en compte d'une ruine plus globale, phasage de travaux différents, restauration d'une butée de pied...). La réactivité et le sens de l'anticipation géotechnique furent alors des atouts précieux.

2.3 Les éléments topographiques

Seuls des levés topographiques permettent de quantifier les volumes et les masses de sol impliquées. Au cours de ces opérations d'urgence, 3 niveaux de levés ont été notés.

- Un levé initial d'urgence permettant l'évaluation métrique des longueurs et des pentes. Avec peu de moyens (décamètre, télémètre), il offrit une précieuse réactivité en vue des premières modélisations exploratoires, voire engagement des premiers travaux conservatoires.
- Un levé centimétrique effectué à l'aide de drones (orthophotogramétrie ou lidar) n'est intervenu que dans un second temps. Bien que plus précis, il demandait cependant des temps de traitements plus longs en raison du délai de lancement de ces opérations ainsi que de la phase de traitement des données acquises.
- Dans un dernier temps furent envisagés de nouveaux levés à échéance régulière. Soit des cibles rapidement déployables permettaient le suivi de certains points fixes

(rail, maçonnerie existante...), soit de nouveaux levés drones permettaient de suivre l'évolution des mouvements de tout le talus (Sèvres et Fontan).

Cette graduation de précision du levé topographique offrit la meilleure réactivité face à l'urgence. Mais de tels levés sur une courte période temporelle ne permirent pas toujours la pleine compréhension d'un mécanisme de ruine, et par extension, la proposition d'une solution de confortement la plus adéquate.

3. Enjeux de la caractérisation géotechnique

L'analyse géotechnique permet de "quantifier" les efforts et les résistances définissant l'état d'instabilité d'un site. Cette quantification demande d'établir une stratigraphie permettant de projeter des ruptures internes potentielles. La caractérisation des paramètres de résistance au cisaillement des sols doit rester simple et s'appuyer sur des ordres de grandeur. Un écoulement hydraulique quasi-permanent ou accidentel doit également être estimé puisqu'étant un critère de dimensionnement important dans des contextes de forts dénivelés ou en présence de sols effondrés et remaniés, déjà caractérisés par de faibles résistances mécaniques.

3.1 Etat avant travaux

L'état d'équilibre d'un site avant et après effondrement donnait d'excellentes indications sur les paramètres mécaniques des matériaux le constituant.

L'observation des pentes de talus et des masses de sols affleurant en surface ont permis une première estimation des résistances mécaniques (via des modèles d'équilibres simples ou par le biais de modélisations en rétro-analyse).

La connaissance du bâti précédent la ruine (grâce aux visites de site pour les brèches, des plans d'archive de la SNCF, ...) offrit également des indications précieuses quant à l'environnement géotechnique de chaque projet. Sur chaque site, une descente d'eau ou d'anciens ouvrages hydrauliques indiquaient la position d'une zone d'écoulement préférentiel et renseignaient sur leur puissance, signe que des drainages simples ne suffisaient pas (mise en place de drains subhorizontaux en complément des barbacanes et nappes drainantes, nécessité de restaurer la descente d'eau du mur à arcatures ou des traversées sous voirie pour les brèches). Des soutènements légers ou lourds, tantôt présents ou non dans le périmètre de la zone effondrée, révélèrent également si un terrain était constitué de matériaux à-mêmes de « se tenir » seuls et en quels endroits. On a ainsi pu identifier des couloirs d'éboulement, des zones instables ou des zones de sols altérés dont les paramètres mécaniques étaient à définir avec prudence. On pense également aux butées de pied assurées par ces ouvrages sur chacun des chantiers étudiés.

3.2 Reconnaissances géotechniques

Les reconnaissances géotechniques permettent de définir la stratigraphie, les paramètres de sols et les écoulements hydrauliques alimentant le modèle géotechnique, et par extension, les modélisations nécessaires à la justification de stabilité des ouvrages.

Dans le cas de ces chantiers d'urgence, la réalisation d'une campagne de reconnaissances géotechniques présentait deux problèmes :

- Le délai d'intervention et d'analyse des données pouvant être de quelques semaines tandis que les engins de forage destinés aux travaux pouvaient être déployés plus tôt ;
- Les accès aux zones d'investigation les plus pertinentes que sont les pentes de talus ou les zones effondrées, impossibles pour des foreuses géotechniques traditionnelles en comparaison d'engins de travaux d'accès difficile.

A Sèvres, qui était le seul chantier disposant de reconnaissances géotechniques (pressiomètres et carottés), les seules zones investiguées étaient l'amont et l'aval du talus. De précieuses informations étaient données par ces reconnaissances mais uniquement en dehors de la zone précise où le glissement était encore actif.

La conception des ouvrages s'appuya donc sur des plages de valeurs pertinentes d'hypothèse de sol, confortées par l'expérience ainsi que quelques modélisations de l'existant. Au final, la reconnaissance stratigraphique, la présence d'écoulement d'eau ainsi que la réalisation d'essais d'arrachement sur clous (pour quantifier le frottement latéral des sols scellés) se sont avérés être des critères plus dimensionnants que les paramètres de sols eux-mêmes. Ces pourquoi les reconnaissances complémentaires furent réalisées par des pelles araignées ou des mats de forage sur corde, alors présents sur place et capables d'être déployés dans les zones les plus pertinentes.

Des pressiomètres et des carottés avaient toutefois été programmés, mais en prévoyant des ouvrages de confortement capables d'accepter un aléa sur les paramètres de sol, il fut ainsi possible d'engager les travaux avant que les reconnaissances géotechniques donnent leurs résultats, d'ailleurs dans la plage de valeurs envisagée par hypothèses.

Par ailleurs, chaque forage associé aux travaux faisait l'objet d'un suivi régulier, permettant d'alimenter en continu le modèle géotechnique posé par hypothèse, et par conséquent, d'ajuster la conception des ouvrages et des travaux en cours.

4. Enjeux de la définition de l'ouvrage

Réaliser des ouvrages de confortement pour ces chantiers d'urgence présente deux difficultés majeures.

Tout d'abord, la ruine n'est jamais totalement achevée et elle est également impossible à caractériser avec précision par contrainte de temps. C'est donc en supposant une cinématique de ruine du talus (par mécanismes locaux et globaux) qu'est défini un premier ordre de priorité des zones à conforter.

Toutes les méthodes de travail (moyens, phasage et techniques) ne peuvent pas être déployées sur site en raison des difficultés d'accès, des risques d'instabilité provoqués par le poids de machines puissantes, et donc de sécurité des personnels, mais également les rendements pouvant être atteints. Il est donc fondamental de trouver un équilibre réaliste entre diamètre de forage, longueur maximale à exécuter, implantation ou encore maillage d'inclusions.

4.1 Phasage type

A la différence des Brèches de la Roya présentant un site dans un état de stabilité critique qu'il ne fallait pas aggraver et où la ruine était achevée, les chantiers de Sèvres et de Fontan présentaient des mécanismes de ruine encore actifs (ruptures superficielles successives, rupture plus profonde et défaut de butée de pied). Le phasage de principe était le suivant :

- S'assurer de la sécurité des zones d'intervention (Terrassement préliminaires, purge de blocs, création de zones de manœuvres...)
- Prévenir la ruine immédiate de nouvelles zones du talus à l'aide de confortements légers et rapides (restauration des maçonneries et reprise des fondations du mur à arcatures à Fontan, confortement des habitations / route en amont à Sèvres)
- Rétablir des circulations prioritaires en « mode dégradé » dès que possible
- Restituer une butée de pied pour enrayer les mécanismes de ruine globale (Par écran de soutènement à Sèvres et par enrochements à Fontan)

- Opérer un confortement global et plus profond pour limiter le déplacement d'ensemble du talus et selon une maille à resserrer à l'avancement (Clouage du versant à Fontan mais qui fut impossible à Sèvres du fait de la trop grande vitesse du glissement)

4.2 Quelques particularités impactant la conception

Le chantier de Sèvres se composait de 3 ouvrages à construire selon un ordre particulier. Un confortement d'urgence fut réalisé pour tenter d'éviter l'effondrement d'une route en amont, qui ne fut malheureusement pas concluant du fait de la trop forte activité résiduelle du glissement. Un ouvrage aval fut donc immédiatement entrepris pour stabiliser le glissement global et restaurer l'infrastructure de circulation nécessaire à la mobilité du personnel prioritaire du premier confinement. Un confortement amont fut ensuite déployé pour sécuriser le bâti sinistré par l'effondrement de la route. Enfin, un confortement intermédiaire fut réalisé pour assurer la pérennité de stabilité du talus. La principale difficulté était de concevoir chaque ouvrage en anticipant sur la réalisation des suivants. Chaque confortement était donc pensé dans une logique à court terme pour gérer une instabilité locale, mais également à long terme en étudiant la pertinence de son interaction avec de futurs confortements ou terrassements dont la conception restait à finaliser.

Dans le cas des Brèches, le parement en écailles AD/OC® permettait un déploiement rapide et adapté à l'urgence de ces chantiers. Mais les contraintes inhérentes au calepinage de ces écailles préfabriquées, ainsi que le déport de l'entrée en terre des forages de plusieurs mètres, imposaient une grande rigueur d'implantation. Dans un contexte avec peu de moyens topographiques et imposant des adaptations permanentes aux terrains nouvellement terrassés chaque jour, la mobilisation à plein temps de compétences dessin/projection s'est avérée indispensable.

Pour le mur à arcatures, la conception des travaux confortement fut contrainte par l'accès exclusivement sur cordes, ainsi que l'impossibilité d'atteindre le substratum dans l'axe du Talweg (Puissance machine limitant les inclusions à 15m de longueur). Les justifications de stabilité ont donc consisté en la définition d'un clou type répondant aux maximas des capacités matérielles et humaines, puis d'adapter la maille à l'intensité des mécanismes de ruine traités à l'avancement.

5. L'usage de la modélisation

Dans un contexte d'urgence en conception/réalisation, la modélisation est un outil central de chaque phase du projet. En plus de proposer un visuel pertinent pour l'ensemble des interlocuteurs (représenter le phasage de travaux, visualiser un mécanisme de ruine), les modèles numériques permettent de quantifier la pertinence des solutions de confortement et de terrassement envisagés, par le biais d'un coefficient de sécurité globale traduisant l'équilibre entre les sollicitations et les résistances. La fiabilité des modèles dépendant des paramètres les définissant, les forages puis les sondages géotechniques réalisés en cours de chantier seront autant de reconnaissances permettant de fiabiliser ces modèles à l'avancement.

5.2 Le cadre de justification dans la modélisation exploratoire

La modélisation portait sur des ouvrages géotechniques de catégorie 3, l'état de stabilité du site existant était difficilement maîtrisable car faisant suite à des ruines partielles ou totales. Sans caractérisation/quantification des paramètres géotechniques et compte tenu des nombreuses incertitudes sur la stratigraphie, la signification des coefficients de sécurité obtenus devait donc être prise avec du recul. C'est pourquoi la logique qui fut

retenue consistait à raisonner de manière relative, c'est-à-dire en étudiant l'évolution du facteur de sécurité globale entre un état initial et un état conforté ou un état terrassé.

Cette démarche supposait de figer un cadre de justification, et plus particulièrement de recourir ou non aux facteurs partiels. C'est ainsi qu'avant d'envisager des justifications de stabilité sous Approche 2 et 3 (en vue de la production d'une note de niveau G3 selon NF P-94270), il fut fréquent de retenir des modélisations avec facteurs partiels unitaires (à l'exception des paramètres de frottement latéraux ou de résistance d'armature). La pertinence de chaque étape de travaux envisagée faisait ainsi intervenir les coefficients usuels retenus dans la profession : $F=1.00$ pour caractériser un état d'équilibre limite, $F=1.30$ pour caractériser des états d'équilibre transitoires et $F=1.50$ pour assurer le caractère définitif de travaux de stabilisation. Rappelons également enfin le critère de +30-35% sur le coefficient de sécurité global F pour évaluer la pertinence d'un confortement à long terme.

5.1 Etapes de modélisation

La rétro-analyse ou analyse inverse constituait la première étape de modélisation. Elle reproduisait une situation d'équilibre d'un talus en recherchant les paramètres géotechniques la justifiant. En confrontant les résultats obtenus à l'expérience géotechnique, il fut ainsi possible d'approcher, avec une certaine pertinence, les paramètres de résistance au cisaillement (frottement et cohésion) d'une ou plusieurs masses de sol faisant l'objet de l'étude. Également, la prise en compte de niveaux d'eau à des hauteurs différentes et des fissurations observées dans le bâti existant permettaient d'approcher avec prudence les conditions réelles de la ruine.

Ce type de modélisation est intervenue dès le début de la conception, sur la base des premières analyses de terrain dans les jours qui ont suivi la ruine. A ce stade, on ne se focalisait pas sur un seul jeu de paramètres de modèles, mais plusieurs. On envisageait différentes stratigraphies, différents niveaux d'eau et différents état de résistance des sols en place et des sols effondrés. Une telle approche permet de définir une priorité des zones à traiter, ainsi que celles où des reconnaissances s'avéraient indispensables.

Dès le démarrage des travaux, des forages dédiés à la reconnaissance stratigraphique vinrent affiner la modélisation. Par la suite, chaque forage et observations déduites des terrassements ont été intégrés à l'avancement. Puis dans un dernier temps, les essais d'arrachement sur clous ainsi que les résultats de reconnaissances géotechniques vinrent sécuriser les hypothèses retenues.

6. Les expertises nécessaires

La capacité à écouter, analyser, interpréter et prendre des décisions confortées par l'expérience sont les clés de la réactivité dans de telles missions de conception/réalisation. Cela suppose une collaboration étroite et permanente entre plusieurs expertises, ainsi que de disposer d'une maîtrise d'œuvre d'expérience et polyvalente, capable d'apporter la critique aux propositions qui lui sont soumises. Côté entreprise, Sèvres et son contexte de confinement national fut l'occasion de rassembler une équipe de bénévoles et urgentistes portés par une forte motivation, et dont la collaboration fut reconduite à l'identique pour les opérations des brèches de la Roya, du mur à arcatures de Fontan, mais également d'autres opérations aujourd'hui en cours. En voici l'organisation.

Une expertise d'astreinte en risques naturels intervint sur site dans les jours suivants la sollicitation. A la manière d'un enchaînement de missions G5+G2, celle-ci fut alors chargée d'établir la première reconnaissance générale du site, conseiller le MOA et

engager le cas échéant les travaux conservatoires. Elle opéra également des levés préalables, proposant de premiers diagnostics de ruine, dressa l'état de l'art des constructions du site ainsi que sa géomorphologie. De premières préconisations d'ouvrage furent proposées, parfois plusieurs selon les incertitudes.

Une première ébauche de la situation fut alors partagée à l'expertise géotechnique afin d'élaborer les bases d'une conception, consolidée et ajustée par les projections méthodologiques des équipes travaux, ainsi que les recommandations de la maîtrise d'œuvre du projet. Objectif de cette première étape : orienter les équipes vers un type de solution pour opérer les approvisionnements de fournitures adéquats et mobiliser, au plus vite, le déploiement de moyens complémentaires.

Par la suite, les observations de terrain n'eurent de cesse de sécuriser la conception, voire de la réorienter tandis que la modélisation se chargeait d'éprouver la pertinence de chaque choix méthodologique, tout en étant le garant du respect d'une solution de confortement global. Ce dialogue permanent entre expertises complémentaires intégrait également la MOE, à laquelle revenait la responsabilité de valider l'ensemble des scénarios parmi les différents proposés à chaque nouvelle étape du projet.

7. Conclusions

Les 3 chantiers d'urgence de Sèvres, des brèches de la Roya et de Fontan étaient caractérisés par une forte part de conception. La méthodologie retenue reposait sur une forte synergie entre plusieurs expertises, devant réfléchir simultanément aux aspects géométrie, géotechnique, réalisation et modélisation des ouvrages à réaliser. L'absence d'études et de reconnaissances préalables, ainsi que l'urgence d'engager les travaux, a imposé à ces expertises de graduer le niveau de précision de leur conception selon les phases d'avancement de chaque projet.

La première phase fut dominée par la réactivité, imposant une visite de site chargée de réaliser les premiers mètres par des outils simples et rapides. L'établissement d'une première lecture hydro-géo-morphologique et la définition d'un catalogue de moyens matériels déployables sur site permirent d'orienter les premières modélisations de l'existant, et de proposer plusieurs solutions de confortement.

Rapidement, les moyens matériels furent déployés sur place, afin de réaliser des travaux de sécurisation, en parallèle d'opérer des reconnaissances complémentaires. Les premières opérations de confortement furent enclenchées sur la base de modèles sécuritaires. Puis les forages d'exécution ainsi qu'un levé topographique plus précis permirent de consolider les modélisations, et d'orienter la conception des confortements vers sa forme définitive.

Dans une dernière phase, l'accumulation des forages, les reconnaissances géotechniques ainsi que les levés topographiques à l'avancement permirent de sécuriser la conception des ouvrages, de figer les modélisations et de permettre aux travaux de rentrer dans un rythme de croisière.

A chacune de ces phases, le rôle des interlocuteurs SNCF, CEREMA et Département des Alpes Maritimes, s'est avéré fondamental. La réussite de ces défis techniques tient pour beaucoup à leur implication permanente dans la conception, leur expertise des sujets et leur capacité à se positionner efficacement sur les orientations discutées avec l'entreprise.

8. Références bibliographiques

NF P 94-500 (2013) – Missions d'ingénierie géotechnique. AFNOR

NF P 94-270 (2020) – Remblais renforcés et massifs cloués. AFNOR
LCPC (1998). Stabilisation des glissements de terrain. Guide technique. LCPC