APPRENDRE DU PASSE POUR UNE ROUTE ET DES OUVRAGES GEOTECHNIQUES PLUS RESILIENTS

HOW CAN WE LEARN FROM THE PAST FOR MORE RESILIENT EARTH STRUCTURES AND INFRASTRUCTURE

Emeric VEDIE[2], Yasmina BOUSSAFIR[1], Pierre AZEMARD[3], Marianne CHAHINE[4].
[1] *Univ. Gustave Eiffel, GERS, SRO, Marne-la-Vallée, France*
[2,3,4] *Cerema, France*

RÉSUMÉ – Une étude sur un tracé routier existant a permis de réfléchir à la question de la résilience des ouvrages géotechniques vis-à-vis des risques naturels. L'analyse historique du tracé existant a été à la base de ce travail et notamment l'analyse multi-date de l'imagerie satellitaire permettant de visualiser à la fois les travaux de réalisation de l'infrastructure dans les années 2005 et d'identifier les indices d'instabilité tout le long du tracé jusqu'à nos jours.

ABSTRACT – A study of an existing road was the opportunity for reflection on the issue of the resilience of geotechnical structures to natural hazards. The historical analysis of the existing route was the basis of this work, with a the multi-date analysis of satellite imagery, which made it possible to visualise both the infrastructure construction work carried out in 2005 and to identify the signs of instability along the route up to the present day

1. Introduction

Dans le cadre d'un projet de doublement d'une liaison routière, le Maitre d'ouvrage a souhaité améliorer la qualité de ces investissements routiers, pour accroître leur durabilité et leur résistance aux risques naturels, et apporter un caractère « résilient » à l'infrastructure vis-à-vis de ces risques. Pour cela, il a demandé une assistance technique et des conseils en géotechnique, considérant que les tronçons de route concernés se situent dans des zones très difficiles sur le plan géotechnique.

Le présent article détaille la démarche appliquée par le Cerema et l'Université Gustave Eiffel pour répondre aux attentes du maître d'ouvrage. D'une réflexion débutant sur la résilience de la voie, il est vite apparu nécessaire de proposer une approche combinant analyse historique du site et compétences géotechniques. La complémentarité des connaissances à la fois de l'environnement de l'infrastructure (y compris hors emprise) et de la sensibilité et du comportement actuel et futur des ouvrages géotechniques aux aléas géotechniques, permet d'améliorer la résilience de l'infrastructure vis-à-vis des risques naturels, évidemment pour des besoins de dimensionnement des ouvrages neufs mais également par une approche originale de stratégies de gestion de l'itinéraire.

2. Vers une amélioration de la résilience des infrastructures routières et des ouvrages géotechniques aux risques naturels

2.1. *La notion de résilience…*

La notion de résilience a été développée notamment par le neuropsychiatre et psychanalyste français Boris Cyrulnik, pour décrire l'aptitude de la pensée humaine à faire face aux aléas de la vie et à trouver les ressources pour réagir positivement après des évènements plus ou moins dramatiques, et revenir à des modes de vie « normaux ».

Cette notion a été déclinée dans de nombreux domaines autres que les sciences humaines et est utilisée aujourd'hui dans ceux liés aux infrastructures. À la nuance près

qu'une infrastructure est incapable de réflexion propre et que, par la force des choses, la notion de résilience doit se définir en déclinant les méthodologies et les outils permettant d'arriver à des démarches résilientes autour de l'ouvrage et de son usage.

Ainsi, pour parler de résilience, il faut commencer par évoquer les aléas qui sont les évènements susceptibles de perturber le bon fonctionnement de l'infrastructure. Par analogie à la résilience chez l'Homme, les aléas de la vie correspondent aux aléas géotechniques ou naturels. Pour que l'infrastructure soit résiliente, après le déclenchement d'un aléa, il faut qu'il puisse y avoir un retour à un bon état de fonctionnement. Et pour une démarche totalement résiliente, il faut également inclure des notions d'apprentissage, de démarche continue, d'évaluation, en complément des phases de réparation.

La Figure 1 illustre ces différentes notions sous la forme d'une roue, qui reprend assez bien l'idée d'une démarche continue lorsqu'on parle de résilience.

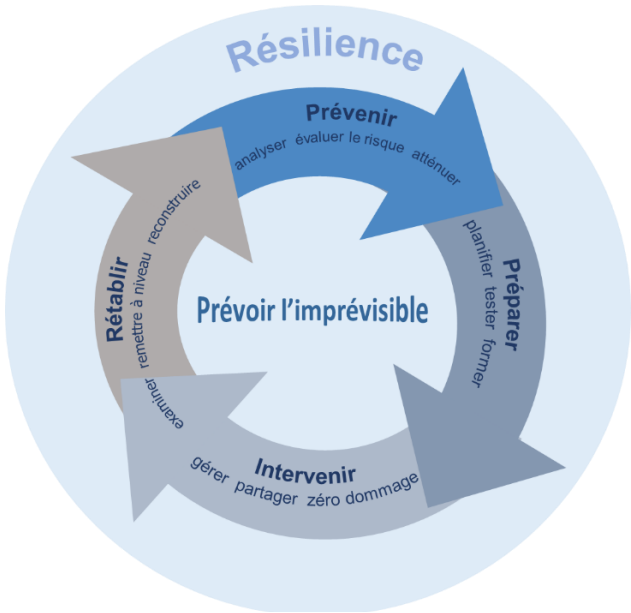

Figure 1. La roue de la résilience (traduit d'après Lange et al., 2016)

2.2. *…appliquée aux infrastructures*

Les risques naturels, lorsqu'ils surviennent, sont susceptibles d'impacter le trafic soit par des ralentissements imposés par la nécessité d'entretenir la route (nettoyage, remise en état des ouvrages, etc.) soit par des coupures d'itinéraire en cas de forts dégâts résultant d'un risque naturel majeur.

Dans l'esprit d'un gestionnaire, la résilience peut correspondre à trois idées principales :

1. L'infrastructure est dimensionnée pour résister à tous les aléas ;
2. Les aléas, s'ils surviennent, n'impactent pas le trafic, sous-entendu l'ouvrage se déforme mais ne rompt pas et l'usage, bien que dégradé est maintenu ;
3. Les aléas s'ils surviennent, endommagent l'infrastructure mais la capacité de revenir rapidement à un état d'usage satisfaisant est réelle.

L'examen de ces 3 situations fait émerger plusieurs idées majeures :

- La connaissance géotechnique des aléas est un préalable indispensable ;
- Le choix de conception des ouvrages ouvre plusieurs possibilités au maître d'ouvrage qui a toute sa place dans cette étape ;
- La stratégie de gestion de l'itinéraire basée sur l'identification des désordres potentiels, la capacité à délester l'itinéraire sur des voies secondaires appropriées, de communiquer aux usagers, de disposer d'équipes pouvant intervenir dans des

délais raisonnables et avec des moyens techniques appropriés aux dommages devient un élément fondamental dans le choix de conception des ouvrages et la résilience.

3. Cas d'un doublement d'infrastructure routière existante

3.1. *Les attentes du gestionnaire/MOA*

La commande du maître d'ouvrage était de disposer d'éléments permettant d'aménager une infrastructure existante en une 2×2 voies la plus résiliente possible vis-à-vis des risques géologiques et géotechniques. Il était ainsi attendu (i) une identification et une caractérisation des familles de risques avérées et/ou potentielles le long du tracé (prédisposition aux instabilités et intensité supposée des phénomènes) et (ii) des préconisations utiles pour dimensionner les ouvrages en tenant compte de l'exposition de l'infrastructure à ces risques. Des recommandations sur les études de risques géotechniques complémentaires à mener étaient également souhaitées en vue d'approfondir la connaissance de l'environnement de l'infrastructure. Cela doit passer par la poursuite de certaines investigations mais aussi par l'assurance d'une définition de l'enchainement et du contenu de missions d'ingénierie géotechnique adaptées.

Plus précisément, le Maitre d'ouvrage souhaitait financer une assistance technique comprenant (i) l'examen de la documentation du projet, basé sur des solutions innovantes et des pratiques permettant d'améliorer la qualité de la mise en œuvre (au regard des pratiques habituelles) et de garantir que les défis géotechniques sont correctement pris en compte dans la conception technique et dans le cycle de vie du projet ; et (ii) des visites d'experts internationaux pour améliorer les connaissances techniques et l'investissement dans des infrastructures de qualité.

3.2. *Le projet dans son contexte environnemental*

Le projet traverse des formations géologiques variées (marnes et argiles, dolomies, volcanisme…) dans un contexte littoral à fort relief. Cette configuration expose ainsi naturellement l'infrastructure à des aléas naturels de diverses typologies. Cette exposition aux risques naturels est d'autant plus importante que s'ajoute à ce contexte (i) une activité sismique régulière et intense, (ii) une pluviométrie particulièrement impactante au regard de la lithologie des reliefs localement chaotiques et escarpés et (iii) un réseau hydrographique littoral largement encaissé.

La morphologie et la lithologie des formations traversées nécessitera dans le cadre du doublement des mouvements de terres considérables déjà à l'origine d'un fort excédent de matériau lors de la construction de la route actuelle.

Dans cet environnement, les facteurs d'instabilité sont à la fois d'origine continentale et océanique mais aussi tellurique et climatique ce qui rend indispensable l'analyse complète du milieu dans lequel serpente l'infrastructure, bien au-delà de son emprise stricte.

3.3. *La démarche suivie jusque-là pour l'infrastructure actuelle*

Au moment de la réponse du Cerema et de l'Université Gustave Eiffel à l'appel d'offre, peu d'éléments étaient disponibles pour évaluer les aléas et la géotechnique du site. Dans les documents fournis, figurait une étude de site (G1-ES de la norme NF P94-500) décrivant la géologie du site et les connaissances générales des aléas naturels affectant l'infrastructure existante (34 pages).

Par la suite, d'autres documents ont été fournis, parmi lesquels :

- le rapport de présentation de l'étude préliminaire du tracé (126 pages) ;
- un rapport sur les principes généraux de construction (G1-PGC de la norme NF P94-500) listant des recommandations constructives pour 64 sites (25 pages) ;

- un rapport d'avant-projet sur l'hydrologie et l'hydraulique (31 pages).

Mais aucune présentation du tracé existant décrivant les unités en déblai et en remblai, de profil en long du projet, ni de synthèse des travaux et techniques de constructions appliquées, ni les études géotechniques de la 2 voies actuelle.

3.4. *La démarche retenue pour la future infrastructure*

La proposition initiale faisant explicitement référence à l'utilisation de données gratuites et la prestation intervenant en pleine pandémie de Covid19, le Cerema et l'université Gustave Eiffel ont pris le parti :

- d'explorer la documentation existante à proximité du site (articles, blogs, diaporamas, thèses, cartes géologiques, etc.)
- d'utiliser des données satellitaires gratuites grâce aux applications Google Earth Pro, Street View,

La nécessité de devoir néanmoins avoir un regard réaliste sur les ouvrages existants a conduit le groupement à s'associer à un partenaire pouvant se rendre sur place. Une visite de site a donc été planifiée à distance, sur la base de la reconnaissance satellitaire, associée à un questionnaire regroupant les interrogations des chargés d'étude.

4. L'intérêt de l'analyse historique du projet

4.1. *L'apport des images satellitaires multi-dates*

Afin d'apprécier la morphologie de l'environnement du tracé de l'infrastructure et de percevoir les évolutions récentes, une analyse des images satellites « open source » a été réalisée. Le support Google Earth Pro ® a notamment été utilisé ; celui-ci a permis de visualiser l'ensemble du linéaire de l'infrastructure (i) avec une vision 3D (MNT au maillage de l'ordre de 25m) et (ii) en multi-dates (depuis 2002, 2004 ou 2006 selon les secteurs soit une période d'observation de l'ordre de 15-20 ans). La relativement bonne résolution des images disponibles permet notamment d'apprécier assez précisément les formes du relief (pentes et typologie des versants amont, oueds et thalwegs, typologie et morphologie des littoraux sableux et rocheux).

L'approche historique du tracé a été appréciée au travers des analyses multi-dates et des photos historiques disponibles. Cela a permis d'apprécier dans certains cas l'aspect initial des terrains avant terrassement, les travaux proprement dit et l'évolution sur certains ouvrages de terrassement en terme à la fois d'instabilités et d'occupation du sol. Cette approche historique a été une des plus enrichissante de l'étude car elle a permis de faire émerger des informations que le maître d'ouvrage n'avait pas fournies initialement.

Les informations que nous avons ainsi pu capitaliser ont porté sur :

(1) les mouvements de terrain surfaciques tels que : grands glissements, érosion de surface, érosion de berge et/ou de talus, éboulements et blocs éboulés… ainsi que leur évolution éventuelle ;

(2) les terrassements « historiques », en lien avec la construction de la route actuelle avec la mise en évidence de techniques de construction des terrassements ;

(3) les ouvrages de type enrochements, murs de soutènement, ouvrages en terre et ouvrages hydrauliques lorsqu'ils étaient visibles à ces échelles d'observation ;

(4) la position et la géométrie de l'infrastructure par rapport à son environnement ;

(5) les différences locales marquantes de lithologie ;

(6) l'occupation du sol et les changements éventuels.

Plus concrètement, ces observations multi-dates se sont avérées très instructives en permettant de visualiser certains détails des travaux de terrassement de la route actuelle, d'apprécier le mouvement des terres, notamment les dépôts (pas ou peu compactés) sur lesquels pourrait s'appuyer l'élargissement de la voirie. Ces constats ont permis

d'identifier des aléas liés à l'état des ouvrages construits initialement et d'alerter le gestionnaire sur l'évolution probable de ces ouvrages.

L'analyse multi-date a aussi clairement révélée la sensibilité à l'érosion, par l'action hydraulique des écoulements continentaux (ruissellements, thalwegs, oueds) ou par l'action marine (recul du littoral par action mécanique des vagues).

4.2. *La contribution participative via les données en ligne*

À l'ère des réseaux sociaux, la recherche d'informations informelles liées à l'existence de blogs ou d'images touristiques a été également très instructive pour les chargés d'étude privés de visite de site.

Les arrière-plans des photos souvenir ou des vidéos tournées par des moyens courants (en voiture ou moto par exemple) ont permis de compléter l'approche satellitaire. Des commentaires sur l'état de la route ont par exemple révélé l'existence d'aléas non recensés par les études, comme des chutes de blocs ou des coulées de boues.

Ces informations ont été intégrées dans l'analyse globale du tracé existant.

À noter que les contributions participatives du « grand public » sont désormais de plus en plus utilisées par les Maitres d'Ouvrages afin de récolter, de manière maitrisée, des données de certains sites évolutifs et de contribuer ainsi à un suivi temporel densifié et économique (prise de photographies notamment). Cela constitue une piste d'amélioration de la connaissance des sites actifs.

4.3. *La richesse de la littérature scientifique*

Une revue de la littérature scientifique a permis par ailleurs de bénéficier de la connaissance et de la caractérisation des instabilités régionales survenant dans des contextes géomorphologiques similaires ; les recherches universitaires offrent en effet une vision scientifique long terme très complémentaire de l'approche opérationnelle suivie par les gestionnaires d'infrastructure.

5. La connaissance et l'apport des acteurs locaux dans une approche résiliente de gestion de l'itinéraire

En complément de l'étude du site par l'analyse des documents et des rapports, le groupement a souhaité aborder la question des aléas existants par des moyens peu traditionnels, basés sur la connaissance de terrain qu'ont les équipes en charge de la gestion quotidienne de la route. Les travaux du Cerema dans le cadre du PN C2ROP par exemple ou des études sur la Route du Littoral à La Réunion, ont en effet montré toute l'importance du « REX », le Retour d'Expérience, dans l'amélioration de la gestion quotidienne et dans la connaissance des aléas (Cerema, 2020).

5.1. *D'une enquête menée auprès des services …*

Pour capitaliser l'expérience des équipes de terrain, une enquête a été élaborée. Elle comprenait un volet général, diffusé aux gestionnaires en vue de recueillir les informations relatives à la construction de l'infrastructure (études préalables et difficultés potentiellement rencontrées lors des travaux). Un volet spécifique s'adressait directement aux équipes d'intervention, sous la forme d'un formulaire via internet. Cette partie de l'enquête devait permettre de collecter des informations sur les pathologies courantes, les désordres et aléas les plus fréquemment rencontrés lors de la gestion de la route, la nature des risques géologiques et géotechniques qui impactaient l'infrastructure au cours de sa vie.

L'exploitation des résultats de l'enquête a mis en évidence un mode de fonctionnement très hiérarchique assez traditionnel. Nous avons aussi pu constater un écart significatif entre notre connaissance des aléas naturels et ceux consignés par le gestionnaire.

Ce faible retour d'expérience pouvait être dû, soit à une réelle absence de risques naturels sur le tracé, soit à une méconnaissance de ces risques, soit encore à une faible remontée d'information de la part des équipes qui vivent avec des aléas aux quotidiens sans forcément ressentir le besoin de faire remonter toutes les informations.

5.2. *… À l'émergence d'une stratégie de conception et de gestion de l'itinéraire*

En matière de résilience, et quelque qu'aient pu être les résultats d'une telle enquête, la démarche de sonder les acteurs et gestionnaires locaux apparaît aussi importante que l'étude géotechnique « classique ». Cela permet de baser les solutions de gestion de l'itinéraire et les choix de conception des ouvrages géotechniques sur des réalités de terrain. La discussion des résultats de l'enquête permet de prendre conscience des enjeux et permet au maître d'ouvrage et/ou au gestionnaire de discuter et d'adhérer aux choix.

De plus, nous avons retenu de cette démarche que la mise en place d'un protocole de capitalisation des événements et des incidents relatifs à la vie de l'infrastructure (ce que l'on appelle le REX) fait partie intégrante de la notion de résilience : en effet, si les problèmes du quotidien ne sont pas connus voire sont ignorés (volontairement ou non), aucune amélioration ne peut émerger. La phase « **PREVENIR** » et « **PREPARER** » de la roue de la résilience (Figure *1*) ne peut alors se dérouler.

Les retours d'expérience prenant en compte les évènements passés permettent d'améliorer grandement les dimensionnements des ouvrages de protection contre les risques naturels en contribuant à mieux connaître les aléas et leur intensité (qui peut évoluer dans le temps, surtout en contexte de changement climatique), à réduire les impacts sur l'infrastructure en menant une gestion préventive des risques sur le restant de l'itinéraire et contribuer *in fine* à une infrastructure résiliente.

D'autre part, les conclusions conduisent aussi à faire émerger des stratégies de gestion de l'itinéraire. Rappelons que la conception des ouvrages peut être menée soit pour résister à l'intensité d'aléa maximale, soit avec un dimensionnement standard, compensé par une aptitude à intervenir rapidement pour réparer. Autrement dit, choisir entre une stratégie d'investissement financier maximal à la construction et réduire les moyens pour l'entretien, ou choisir un investissement moyen pour les travaux et des moyens financiers conséquents pour la gestion de l'itinéraire.

Ces deux stratégies ont été présentées au maître d'ouvrage, en précisant que dans l'état actuel, les voies de délestage du trafic (itinéraires secondaires) en cas de fermeture de la voie étaient quasiment inexistantes et que de nombreuses informations manquaient pour évaluer les délais de réponse des équipes en place et les moyens techniques à leur disposition. Ceci correspond aux étapes « **PREPARER** », « **INTERVENIR** » et « **RETABLIR** » de la roue de la résilience. En l'état, le constat formulé est que la route est très vulnérable aux aléas et ne présente pas de caractère de résilience actuellement.

6. Vers une meilleure connaissance des risques et de leur prise en compte

6.1. *Les aléas naturels*

Les *risques géologiques* identifiés sont ceux prenant naissance au sein des versants naturels environnant le projet routier, que ce soit en amont ou en aval de l'infrastructure (Zone d'Influence Géotechnique). Les risques géologiques se traduisent par des mouvements de terrain (de différents types) dont la survenue peut impacter la route. La fréquence et l'intensité de ces phénomènes est très variable ce qui rend leur analyse d'autant plus pertinente et essentielle en vue d'améliorer (i) le dimensionnement du projet

et des parades associées et (ii) la gestion de l'infrastructure (anticipation et gestion des évènements).

Parmi les *risques géologiques* présents sur l'itinéraire, l'analyse « traditionnelle » par l'imagerie satellitaire a permis d'en distinguer notamment quatre, qualifiés de probables à très probables : le risque rocheux (chutes de blocs et éboulements en masse) ; les instabilités de versant (de grande ampleur) (Figure *2*) ; l'érosion littorale ; les ravinements de versant et apports de matériaux. L'intensité de ces aléas a été définie grâce à l'analyse multi-date des images satellitaires et aux données des réseaux sociaux qui permettent de bénéficier d'images des évènements récents.

Figure 2. Exemple de deux grands glissements le long de l'itinéraire pouvant être activés par les travaux de doublement

Deux risques plus rares ont été signalés : les affaissement et effondrements en lien avec des cavités souterraines ; les inondations par rupture du barrage (en amont).

En parallèle, le risque tellurique (séismes) a été identifié à partir de l'analyse de la littérature (thèse, articles) comme un risque majeur présent sur tout le tracé. C'est un facteur aggravant dont l'influence est historiquement avérée.

Toutes ces informations ont été transmises pour que les études géotechniques qui complèteront la connaissance des aléas, permettent de dimensionner au mieux les nouveaux ouvrages géotechniques.

6.2. *Les risques liés aux ouvrages existants*

Les *risques géotechniques* identifiés sont ceux affectant les unités de terrassement, c'est-à-dire les ouvrages en terre que sont notamment les remblais, les talus de déblai et de remblai. L'analyse multi-date a été très intéressante pour évaluer ces risques.

Figure 3. Exemple de risque géotechnique par effacement des formes des dépôts en bordure de littoral (2004 vs 2019)

Compte-tenu des nombreux jeu d'images disponibles et de la taille du projet, il a été possible grâce à cette analyse historique des travaux de distinguer quatre risques :

(1) le risque de tassements et rupture des bords des remblais mal compactés : plusieurs images ont montré l'existence de dépôt contigus aux remblais routiers, probablement non conçus pour recevoir des élargissements (Figure 3);

(2) le risque d'entraînement de particules sur l'infrastructure par ravinement au sein des talus (de déblais et de remblais) : c'est un des aléas les plus visibles sur les images et qui se manifeste rapidement après la création des talus. Tout projet d'élargissement conduira à remobiliser les matériaux en talus, par ravinement, dès les premières années de vie de l'ouvrage ;

(3) le risque de rupture par affouillement ou érosion interne des pieds de remblais situés en zone de thalweg ou de lit de rivière, a été mentionné suite aux nombreux retours d'expérience récents dans des contextes très similaires et une perspective de changement climatique (effondrement de l'A75 à Lodève, Vallée de la Vésubie, etc.) ;

Ainsi les élargissements pourraient se projeter dans des endroits remodelés à la suite des premiers travaux, sur des reliefs qui paraissent aujourd'hui totalement naturels par des processus d'effacement de type érosion et re-végétalisation.

Les conclusions sur ces risques géotechniques conduisent à préconiser des reconnaissances spécifiques à ces sites pour évaluer et quantifier autant que possibles ces aléas d'un caractère particulier.

7. Conclusion

La commande du Maitre d'Ouvrage a été motivée, très en amont d'un projet de doublement routier, par le besoin de disposer d'une étude évaluant l'impact des risques naturels sur le maintien du niveau d'usage de la future route. Les risques naturels, lorsqu'ils surviennent, sont susceptibles de générer des ralentissements imposés par la nécessité d'entretenir la route ou de fermer l'itinéraire en cas de risque naturel majeur. L'étude réalisée conjointement par le Cerema et l'Université Gustave Eiffel a mis en évidence l'existence de plusieurs risques naturels d'intensité variable (de faible à majeur) affectant cet usage.

L'approche historique a permis de prendre en compte des éléments de connaissance du passé, que ce soit des travaux de l'époque ou du comportement constaté des formations depuis la création de l'infrastructure. Cette approche est nécessaire pour orienter efficacement les études ultérieures.

Le projet peut augmenter la vulnérabilité de l'infrastructure aux risques géologiques (réactivation d'instabilités de versant, rapprochement du littoral, sismicité, etc.) mais également géotechniques. L'analyse historique des images satellitaire a ainsi fortuitement mis en évidence des risques géotechniques propres au projet de doublement : par exemple, la présence d'importants et nombreux dépôts de matériaux naturels probablement peu ou mal compactés de nature à créer un risque de tassement ou de rupture en cas d'élargissement de la voie sur ces ouvrages, et des risque d'érosion des remblais en fond de thalweg, etc..

Créer une infrastructure résiliente nécessite au final :

- De bien connaître les aléas : cette phase conditionne tous les choix en matière d'investissement, de conception et de gestion future de l'itinéraire. L'analyse historique est primordiale pour dresser le bilan des connaissances initiales ;
- De bien connaître l'infrastructure existante : les possibilités offertes par les équipes de gestion en place, les itinéraires secondaires de délestage du trafic, la possibilité de communiquer en cas de risque, … sont autant d'éléments pouvant motiver les choix finaux. Interroger la mémoire des personnels est très intéressante à ce titre ;
- De mettre en place une démarche basée sur l'analyse des évènements qui peuvent arriver, et sur une forte anticipation en vue de réparer, rétablir et prévenir les risques.

8. Références bibliographiques

Cerema (2020). Formalisation d'un retour d'expérience à la suite d'un événement de chutes de blocs sur infrastructures de transport. Note méthodologique. Collection Références. C2ROP. Chutes de Blocs Risques Rocheux Ouvrages de Protection. Cerema.

Lange et al. (2016). The Queensland Experience of the summer of 2013. Toward a culture of resilience. Routes-Roads 2016 – Nº 370, pp. 51-57, PIARC