

Modélisation des scénarios de défaillance des infrastructures de transport à grand linéaire en zones de montagne

Théotime MICHEZ^{1,2}, Laurent PEYRAS², Stéphane LAMBERT³, Sébastien REYNAUD¹, Patrick GARCIN¹

¹ *Egis, Seyssins, France*

² *Aix Marseille Univ, INRAE, RECOVER, Aix-en-Provence, France*

³ *IGE-INRAE, Grenoble, France*

RESUME

En zones de montagne, les infrastructures de transport à grand linéaire (routes, autoroutes, voies ferrées) sont soumises à de nombreux aléas naturels notamment hydro-gravitaires (glissements, chutes de blocs, aléas torrentiels, etc...). Ceux-ci peuvent les dégrader voire amener à leur rupture, entraînant un risque pour les usagers et une détérioration du service. Les gestionnaires de telles infrastructures font face à plusieurs difficultés pour gérer ces risques. Premièrement, la représentation des risques et leur connaissance à l'échelle d'une infrastructure, composée de nombreux ouvrages et soumise à plusieurs aléas. Deuxièmement, la priorisation des actions de traitement des risques dans le cadre d'une gestion pluriannuelle. Dans ce contexte et dans le cadre d'une thèse CIFRE conduite par EGIS et INRAE, nous proposons un modèle pour représenter l'ensemble des scénarios de défaillance préjudiciables pour de telles infrastructures. Ce modèle est basé notamment sur les méthodes de la Sécurité de Fonctionnement. Il est voué à être appliqué à un linéaire de plusieurs kilomètres soumis à différents aléas. Un développement à venir sera la quantification du risque associé aux différents scénarios modélisés, pour l'identification des sites les plus sensibles, dans un contexte de connaissances hétérogènes et imparfaites.

Mots-clés Analyse de risques, aléas naturels, infrastructures à grand linéaire, gestion de patrimoine, arbre de défaillance

Modalité de présentation souhaitée : présentation orale.

I. INTRODUCTION

Les infrastructures de transport font partie des systèmes d'infrastructures les plus sensibles de nos sociétés. Elles permettent la circulation de biens et services essentiels, localement comme à grande échelle. Leurs défaillances peuvent donc avoir des conséquences socio-économiques significatives, en plus de présenter des dangers pour les utilisateurs et de générer des coûts élevés pour les gestionnaires (Hassan et al., 2022; Ouyang, 2014). En zones de montagne, ces infrastructures sont soumises à de nombreux aléas, notamment d'origine hydro-gravitaire. Ces

aléas incluent, sans se limiter, les chutes de blocs, les glissements de terrain, les crues, le charriage solide, les laves torrentielles ou encore les avalanches. Ils peuvent entraîner le recouvrement des infrastructures, la dégradation des ouvrages, voire des destructions et effondrements dans des cas extrêmes (Argyroudis et al., 2019; van Westen et al., 2006). De nombreux événements de ce type, de faible intensité pour la majorité, sont recensés chaque année en France. Les régions montagneuses peuvent présenter des enjeux spécifiques et majeurs (Terzi et al., 2019). L'économie du tourisme et les flux frontaliers dans certaines vallées des Alpes en sont deux exemples. Il s'agit donc de préoccupations importantes, que les gestionnaires de telles infrastructures ne peuvent ignorer.

Les gestionnaires d'infrastructures de transport à grand linéaire (routes, autoroutes, voies ferrées) en zones de montagne sont confrontés à plusieurs difficultés pour gérer les risques hydro-gravitaires. Une première difficulté est l'identification et la connaissance des aléas et de leurs impacts possibles. En France, il n'y a pas de véritable cadre réglementaire pour leur prise en compte, et les méthodes mises en place varient beaucoup d'un gestionnaire à l'autre (CGEDD, 2013). Connaître de manière exhaustive tous les scénarios préjudiciables sur un linéaire de plusieurs kilomètres d'infrastructures routières constitue un véritable verrou à la fois technique et scientifique. Les études et surveillances mises en place se concentrent généralement sur un unique aléa à l'échelle d'un site ponctuel. Une deuxième difficulté est le choix et la priorisation des actions de mitigation. La complexité des enjeux et les effets du changement climatique en cours sont des facteurs qui rendent la mesure du risque difficile (Terzi et al., 2019) et il serait illusoire de vouloir réduire ce risque à zéro.

Pour répondre à ces difficultés, l'entreprise d'ingénierie Egis et l'institut de recherche INRAE se sont associés pour conduire une thèse CIFRE à partir de 2024. L'objectif est de développer des méthodes d'analyse de risques et d'aide à la décision pour les gestionnaires autoroutiers, routiers et ferroviaires.

Plusieurs travaux ont étudié l'impact d'aléas gravitaires spécifiques sur les routes de montagne, notamment le risque rocheux (Kanno et al., 2023; Mignelli et al., 2012). Les méthodes développées dans ces travaux s'appuient notamment sur la simulation numérique, les historiques d'événements, l'optimisation mathématique, ou encore la méthode de l'arbre d'événements. Elles sont plus ou moins facilement applicables selon leur degré de complexité et le volume de données requis, et elles prennent en compte un aléa unique.

D'autres travaux se sont penchés sur des analyses de risques multiples, mais à l'échelle d'un ouvrage routier. Argyroudis et al. (2019) proposent une méthodologie basée sur la modélisation numérique à éléments finis et les courbes de fragilité pour identifier les risques et les étudier en détail sur un ouvrage. Cette approche permet une analyse avancée, mais serait inapplicable à l'échelle d'un linéaire de plusieurs kilomètres avec plusieurs dizaines d'ouvrages.

Il existe aussi des méthodes multirisques à l'échelle d'un réseau d'infrastructures de grande taille. Le projet européen INFRARISK (Clarke and O'Brien, 2016) a permis le développement de méthodes pour l'analyse d'un réseau routier soumis aux aléas de crue, séisme, et événements gravitaires. L'échelle d'étude est bien supérieure à celle d'un ouvrage. Plusieurs approches sont proposées, certaines très complexes, pour étudier la réponse du réseau aux aléas naturels

extrêmes. Elles reposent notamment sur les réseaux bayésiens, l'analyse de données spatiales et temporelles, les courbes de fragilité, et l'aide à la décision multicritère. Jaboyedoff et al. (2021) et Petrova (2020) utilisent aussi des méthodes d'analyse de données et de simulations stochastiques à l'échelle d'un réseau routier pour l'analyse des risques naturels. Ces méthodes fonctionnent bien lorsque le volume de données sur les événements passés est suffisant. Elles sont donc adaptées à l'échelle d'un réseau ou d'un territoire, mais moins pour une unique infrastructure linéaire.

Enfin, quelques travaux de la littérature technique s'intéressent, comme nous souhaitons le faire, aux risques hydro-gravitaires à l'échelle d'une infrastructure et de ses multiples ouvrages. En France, le Cerema a développé une méthode simplifiée d'analyse des risques, basée sur l'aide à la décision multicritère, déclinée en guides techniques pour différents types d'ouvrages routiers (Cerema, 2018; SETRA, 2013). Cette méthode est simple d'utilisation, couvre un large éventail de risques, et peut être appliquée à chaque ouvrage qui compose la route étudiée. Elle est conçue pour être une analyse de risques préliminaire. En Suisse, l'Office Fédéral des Routes a publié une méthodologie pour la gestion des risques gravitaires sur les routes nationales (ASTRA, 2012). Cette méthode recommande une évaluation de chaque aléa le long du linéaire, selon 4 classes d'occurrence et 3 classes d'intensité, puis la construction de cartes des zones impactées. Des valeurs chiffrées du risque sont ensuite données pour les différentes configurations.

Les infrastructures de transport à grand linéaire en zones de montagne peuvent être considérées comme des systèmes complexes, en raison des nombreux ouvrages qui les composent et des multiples interactions entre eux et avec leur environnement. Les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement, développées pour l'analyse de risques dans les domaines industriels, permettent de modéliser des systèmes complexes (Modarres, 1993; Villemeur, 1988). Elles ont été appliquées avec succès à des infrastructures à grand linéaire, notamment les digues (Serre, 2005; Vuillet, 2012), les ouvrages de la RATP (Paterna Hidalgo, 2015), les réseaux techniques urbains (Dabaj, 2021) ou encore les pipelines (Shahriar et al., 2012). Terzi et al. (2019) comparent plusieurs méthodes de modélisation des systèmes complexes pour l'analyse multirisque en zones de montagne. Parmi les principales, on peut citer les méthodes arborescentes (arbre d'évènements, arbre de défaillance, nœud papillon), les méthodes basées sur les réseaux, les graphes de Markov, les réseaux de Pétri, les graphes causaux ou encore les méthodes de dynamique des systèmes. Ces méthodes de modélisation peuvent être précédées par une première étape d'identification systématique des risques, pour laquelle peuvent être mises en œuvre des méthodes comme l'analyse fonctionnelle, l'analyse préliminaire des risques et l'Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (Villemeur, 1988).

De nombreuses méthodes ont donc été développées pour l'étude des risques sur les routes de montagne, mais il n'y a pas, à notre connaissance, de modèle prenant en compte tous les aléas sur une infrastructure à grand linéaire. Il existe néanmoins des démarches pertinentes d'analyse de risques pour la modélisation des systèmes complexes, en particulier dans le domaine de la Sûreté de fonctionnement. Dans notre travail, nous souhaitons aider les gestionnaires d'infrastructures dans l'identification et la compréhension de ces risques, en répondant à la question scientifique suivante. Comment modéliser les scénarios préjudiciables pour une infrastructure de transport à

grand linéaire soumise à des aléas naturels d'origine hydro-gravitaire ? Le modèle recherché est qualitatif, et doit pouvoir servir de base à la mesure du risque et la priorisation des actions de mitigation.

Dans cet article, nous développons un modèle pour répondre à cette question. Nous présentons son développement, testons son applicabilité sur un cas d'accident historique, et discutons de ses avantages et inconvénients.

II. MATERIELS ET METHODES

A. Les infrastructures de transport à grand linéaire en zones de montagne

Le système que nous étudions est un tronçon d'infrastructure de transport à grand linéaire, en zones de montagne, dont la longueur est de l'ordre d'une dizaine de kilomètres.

Ce tronçon d'infrastructure comprend une multitude d'ouvrages de génie-civil, notamment des viaducs et des tunnels, mais aussi la voirie, des ouvrages en terre (déblais et remblais), des ouvrages de soutènement (murs), des ouvrages traversants et des ouvrages de protection contre les risques naturels (OPRN). Les ouvrages traversants, appelés passages inférieurs ou passages supérieurs, peuvent être des ponts, des tranchées, ou encore des ouvrages hydrauliques permettant à une autre infrastructure ou un cours d'eau de traverser.

Ce tronçon est aussi soumis à différents aléas, en particulier les aléas d'origine hydro-gravitaire propres aux zones de montagne.

B. L'analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle est décrite comme « identification, caractérisation de ce qui est attendu » (Mortureux, 2016) et sert de fondement pour l'analyse de risques.

Une méthode d'analyse fonctionnelle couramment utilisée en génie civil est la méthode APTE (Zwingelstein, 1996), c'est cette démarche qui est utilisée dans notre étude. Selon l'approche APTE, le fonctionnement d'un système est caractérisé à l'aide de trois types de fonctions, définies comme ci-dessous par (Peyras, 2003) :

- Les fonctions principales, correspondant aux flux mettant en relation deux milieux extérieurs via le système, définissent les besoins auxquels répond le système ;
- Les fonctions de contrainte, correspondant aux interactions entre les composants du système et les milieux extérieurs, sont les contraintes imposées au système ;
- Enfin, les fonctions techniques, correspondant aux interactions entre les composants eux-mêmes, sont les solutions mises en œuvre lors de la conception du système.

Dans l'analyse fonctionnelle, les fonctions du système et de chaque sous-système et composant qui le constitue sont identifiées.

C. L'AMDE

L'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) est une approche systématique et exhaustive d'analyse des défaillances d'un système, qui s'appuie sur une analyse fonctionnelle détaillée (Mortureux, 2016). Elle est mise en œuvre dans notre étude.

Le principe général de mise en œuvre de l'AMDE repose sur un tableau d'analyse fonctionnelle qui liste, pour chaque composant du système, les fonctions principales, de contrainte et techniques (voir partie II.B). Ce tableau est ensuite complété en listant les informations suivantes (Villemeur, 1988; Zwingelstein, 1995) :

- *Modes de défaillance* (une fonction n'est plus remplie) ;
- *Causes* des modes de défaillance ;
- *Effets* des modes de défaillance sur le système et ses autres composants.

L'analyse fonctionnelle et l'AMDE permettent une identification détaillée des risques, sur laquelle peut s'appuyer la modélisation des scénarios.

D. Méthodes des Arbres de défaillance et des Graphes causaux

Parmi les méthodes de modélisation des systèmes complexes citées en introduction, celles des *arbres de défaillance* et des *graphes causaux* apparaissent comme les plus appropriées pour nos travaux. Ce sont des méthodes adaptées aux défaillances d'ouvrages de génie civil (Serre, 2005) et relativement simples, ce qui permet de faciliter la participation des différentes parties prenantes (Terzi et al., 2019).

Dans la mise en œuvre des graphes causaux, à partir de l'AMDE, nous identifions deux types d'évènements (Peyras, 2003) : les *défaillances* (ou fonctions non réalisées) et les *phénomènes*. Les défaillances correspondent aux modes de défaillance de l'AMDE, et les phénomènes correspondent aux causes et effets. Lorsqu'un phénomène est à la fois l'effet d'une défaillance et la cause d'une autre, il constitue un lien entre deux défaillances en cascade. Ainsi peuvent être construits l'ensemble des scénarios.

Nous mettons en œuvre la méthode des arbres de défaillance à partir de l'AMDE, en nous appuyant sur l'expertise (Villemeur, 1988). Cette méthode permet de représenter de manière arborescente les enchainements et combinaisons d'évènements conduisant à un unique évènement redouté.

III. DEVELOPPEMENT DU MODELE DES SCENARIOS DE DEFAILLANCE

Le développement du modèle repose sur 3 étapes (FIGURE 1) : l'analyse fonctionnelle, l'AMDE, et la construction des scénarios à l'aide d'arbres de défaillance ou de graphes causaux.

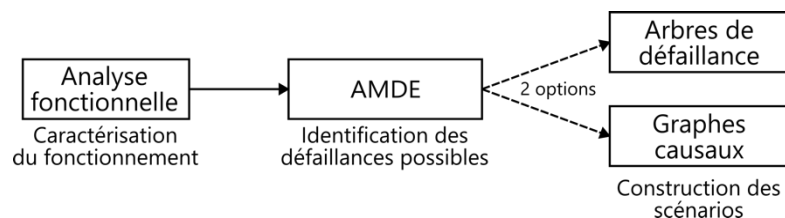


FIGURE 1. Démarche générale de développement du modèle

A. Analyse fonctionnelle

Le système d'étude est un tronçon d'une dizaine de kilomètres environ, et inclue l'ensemble des ouvrages y compris les ouvrages de protection (voir partie II.A). Pour étudier les fonctions du système et de ses composants, nous définissons trois niveaux de granularité :

- G0 : le système dans son ensemble,
- G1 : les segments homogènes,
- G2 : les ouvrages composant les segments.

Les segments du niveau de granularité G1 sont homogènes face au risque. Ce découpage est défini par une double considération : par homogénéité selon les aléas et selon la typologie des ouvrages qui les composent (viaducs, tunnels, remblais, ...) (Kaundinya et al., 2016).

Nous identifions le milieu environnant du système selon quatre catégories (voir FIGURE 2) :

- Les acteurs en lien avec le système (usagers, gestionnaire, ...),
- Les infrastructures (prolongation de l'infrastructure de part et d'autre du segment étudié, infrastructures avoisinantes et traversantes),
- L'environnement naturel de montagne en lien avec le système (en particulier les aléas d'origine hydro-gravitaire),
- L'environnement naturel non spécifique aux zones de montagne (sols sollicités et autres aléas naturels).

Les fonctions principales du tronçon dans son ensemble (analyse fonctionnelle externe) sont représentées sur la FIGURE 2. La fonction principale essentielle est de permettre aux usagers de se déplacer. Les fonctions de contrainte du tronçon sont essentiellement de résister aux diverses sollicitations (courantes et exceptionnelles) et d'avoir un impact acceptable sur son environnement (naturel et infrastructures voisines).

Les fonctions des segments et des ouvrages (analyse fonctionnelle interne) ne sont pas toutes détaillées dans cet article, et seul un extrait est présenté dans le TABLEAU 1.

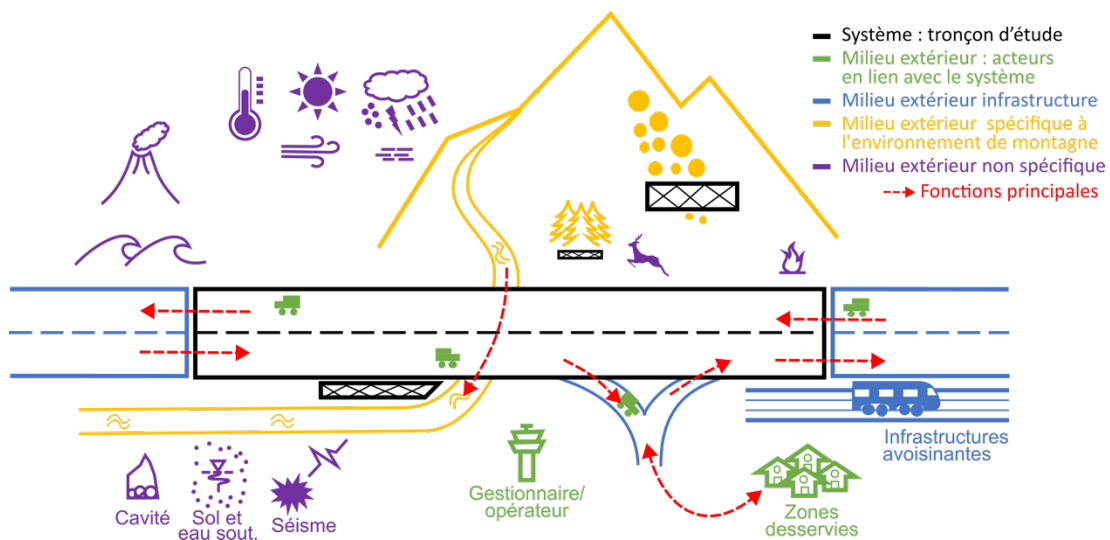


FIGURE 2. Tronçon d'étude, milieu environnant et fonctions principales

TABLEAU 1. Extrait du tableau d'analyse fonctionnelle interne du tronçon

Ouvrage	Fonctions principales	Fonctions de contrainte	Fonctions techniques
Voies de circulation	<ul style="list-style-type: none"> • Permettre aux usagers de se déplacer • Permettre l'accès aux zones desservies 	<ul style="list-style-type: none"> • Résister aux sollicitations courantes • Être protégée des aléas extérieurs 	/
Talus de remblai	/	<ul style="list-style-type: none"> • Résister aux sollicitations courantes <ul style="list-style-type: none"> • Résister aux aléas extérieurs • Ne pas générer d'incident sur les avoisinants 	<ul style="list-style-type: none"> • Soutenir les voies

Enfin, pour détailler la fonction de résistance aux aléas extérieurs, nous avons croisé chaque aléa de montagne identifié avec chaque type d'ouvrage et listé les impacts structurels possibles. Un extrait de ce tableau de croisement est présenté en TABLEAU 2.

TABLEAU 2. Extrait du tableau croisé aléas/ouvrages avec description des impacts redoutés

Ouvrage \ Aléa	Avalanche	Crue (liquide)	Charriage solide	Lave torrentielle	Glissement de terrain (aval, amont, global)	Chute de blocs
Mur de soutènement (béton, sol renforcé, ...)	/	Affouillement, poussée hydro, rupture	Affouillement, poussée hydro, rupture	/	Dégradations importantes voire rupture	Dégradations localisées
Talus de remblai (ouvrage en terre, sans mur, soutenant la chaussée. Chaussée non considérée sur cette ligne)	/	Affouillement, érosion, infiltration, potentiellement jusqu'à rupture	Affouillement, érosion, infiltration, potentiellement jusqu'à rupture	Faibles dégradations (si le remblai dévie la lave)	Dégradations importantes voire glissement	Dégradations localisées voire glissement

B. Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE)

La méthode AMDE a été appliquée au système, pour chaque type de segment et chaque type d'ouvrage. Une attention particulière a été portée sur les phénomènes à la fois causes d'une défaillance et effets d'une autre, et à leurs formulations. Ceci permet de faciliter l'identification des défaillances en cascade lors de la construction des scénarios. Un extrait du tableau d'AMDE est présenté en TABLEAU 3.

TABLEAU 3. Extrait du tableau d'AMDE, les talus de remblai

Type de segment	Ouvrage	Fonctions principales	Fonctions techniques / de contrainte	Modes de défaillance	Causes	Effets
Segment courant (rasant, déblai ou remblai)	Talus de remblai	/	Résister aux sollicitations courantes	Défaut intrinsèque à un talus de remblai	Défaut de conception, d'exécution, ou vieillissement d'un talus de remblai sans maintenance adaptée	Dégradation, rupture totale ou partielle d'un talus de remblai
		/	Résister aux aléas extérieurs	Impact d'un aléa d'intensité supérieure à la résistance d'un talus de remblai	Cf tableau croisé aléas / ouvrages (TABLEAU 2)	Dégradation, rupture totale ou partielle d'un talus de remblai
		/	Soutenir les voies	Un ouvrage impacte la voie	Dégradation, rupture totale ou partielle d'un talus de remblai	Dégradation, destruction de la voie
		/	Ne pas générer d'incident sur les avoisinants	Un avoisinant est impacté	Dégradation, rupture totale ou partielle d'un talus de remblai	Danger pour un avoisinant, impact environnemental

C. Construction des scénarios

La mise en œuvre des deux méthodes des *graphes causaux* et des *arbres de défaillance* a permis de constater que les arbres de défaillance étaient plus adaptés à notre système d'étude. En effet, la majorité des défaillances en cascade obtenues conduisent à la perte des fonctions principales du système. Ainsi, la modélisation par les arbres de défaillance est possible, et elle est plus simple à visualiser qu'avec les graphes causaux.

L'usage de la méthode des arbres de défaillance repose classiquement sur la pratique de l'expert. Plusieurs auteurs ont étudié les liens entre cette méthode et l'AMDE pour y apporter du systématisme (Bluvband et al., 2005; Ruijters and Stoelinga, 2015). Nous proposons en ce sens une méthodologie, illustrée sur le schéma FIGURE 3, pour systématiser la construction des arbres de défaillance à partir de l'AMDE. Les événements redoutés, ou défaillances principales, correspondent aux défaillances d'ouvrages entraînant directement la perte d'une fonction principale du système. Cette méthodologie a été codée en langage Python pour en éprouver le caractère systématique, et traiter des tableaux d'AMDE de tailles conséquentes.

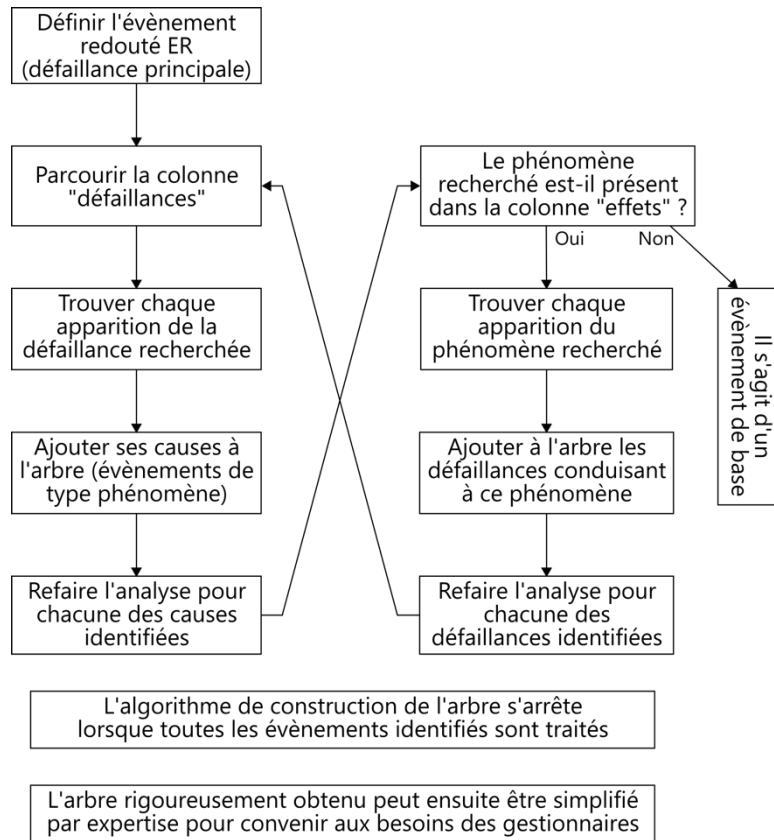


FIGURE 3. Méthodologie développée pour construire un arbre de défaillance à partir d’une AMDE

La structure générale du modèle proposé est illustrée en FIGURE 4.

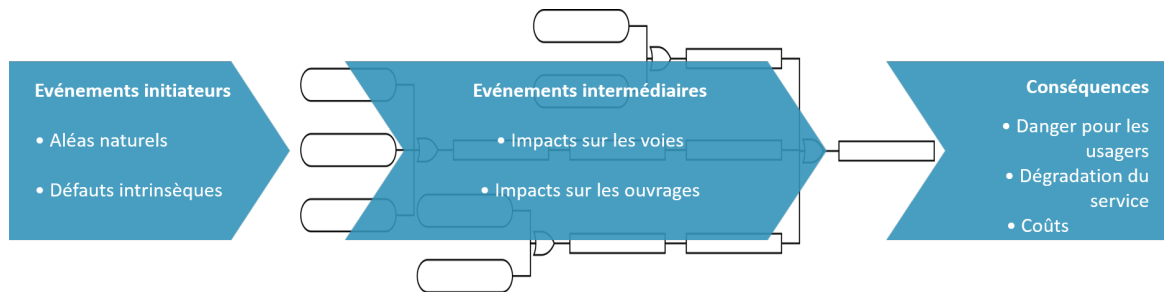


FIGURE 4. Illustration du modèle proposé, par la méthode de l’arbre de défaillance

IV. APPLICATION A UN ACCIDENT HISTORIQUE

Le modèle développé en partie III est appliqué à un cas d’accident historique : l’éboulement de mars 2006 sur la route du littoral RN1 à la Réunion. Les descriptions du contexte et de l’évènement s’appuient sur le rapport (CGPC, 2006), réalisé peu de temps après l’éboulement. Il est possible que certaines informations aient été rectifiées par la suite.

A. Contexte

L'infrastructure (RN1) est une route à 2x2 voies avec un trafic élevé, reliant les communes du littoral ouest de la Réunion. Le segment où s'est produit l'éboulement de mars 2006 est un remblai côté mer, soutenu par un mur en terre armée (TA), et des tétrapodes sont présents en contrebas. Côté terre, une falaise d'une centaine de mètres de haut surplombe la route. L'aléa rocheux était identifié, avec des événements réguliers, et un écran de protection en gabions protégeait la route des chutes de pierres et blocs. Le profil en travers schématique FIGURE 5 et la photo FIGURE 6 illustrent le contexte du segment.

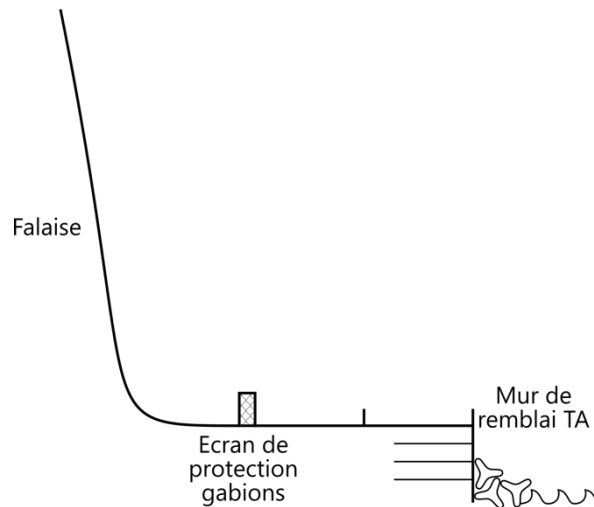


FIGURE 5. Profil en travers schématique du segment du cas d'application



FIGURE 6. Photo représentative du segment (plus récente, d'après Imaz Press Réunion, 17 avril 2022)
<https://imazpress.com/actus-reunion/la-route-du-littoral-est-rouverte-sur-4-voies>

B. Modélisation des scénarios de défaillance

L'analyse fonctionnelle du système est schématisée FIGURE 7 sous la forme d'un bloc diagramme fonctionnel (Zwingelstein, 1995).

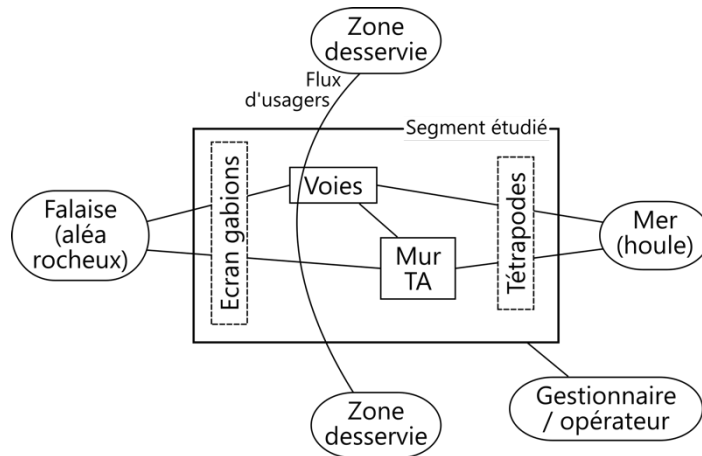


FIGURE 7. Schéma de l'analyse fonctionnelle du système par un bloc diagramme fonctionnel

L'arbre de défaillance obtenu par cette application est présenté FIGURE 8.

C. Evènements de mars 2006

Le 24 mars 2006, un éboulement rocheux d'environ 25 000 m³ a eu lieu. Cet évènement a entraîné la destruction de l'écran de protection en gabions, le recouvrement de la voie, et une dégradation locale du mur de remblai en terre armée. La dégradation du mur n'a pas compromis sa stabilité. L'évènement dramatique a entraîné la mort de deux personnes et un blessé grave, et la route a été fermée plusieurs semaines.

Ces évènements sont mis en évidence en bleu sur la FIGURE 8. Les portes logiques utilisées sont des portes « ou » selon le formalisme usuel, indiquant que chaque évènement d'entrée peut générer l'évènement de sortie. Il est aussi possible qu'un enchaînement d'évènements identifié n'ait pas lieu. Par exemple, le mur a subi une dégradation mais celle-ci a été suffisamment faible pour ne pas compromettre sa fonction de soutènement des voies. Les évènements élémentaires, initiateurs, sont représentés dans des cellules arrondies.

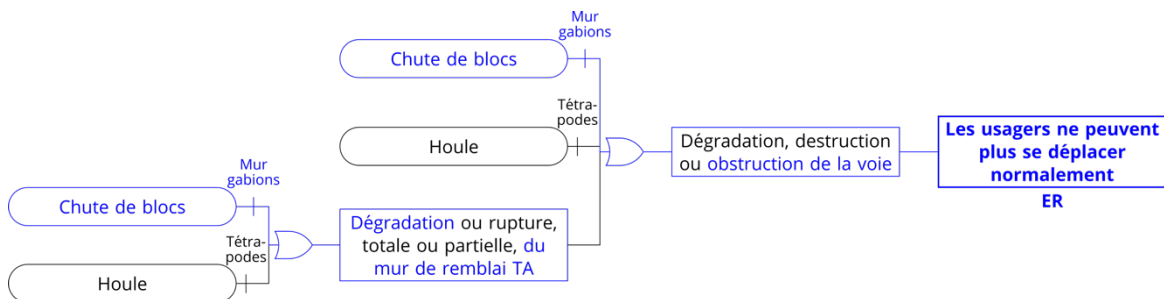


FIGURE 8. Modèle des scénarios de défaillance du système sous forme d'arbre de défaillance, avec mise en évidence des évènements de mars 2006

D. Discussion

L'arbre de défaillance a bien permis de modéliser les scénarios préjudiciables survenus, parmi l'ensemble des scénarios possibles. En ce sens, il répond à la question posée en introduction. Les ouvrages de protection y figurent sous forme de barrières de prévention (Mortureux, 2016), d'autres types de mesures de sécurité pourraient être représentés.

La méthode de modélisation développée aidera donc les gestionnaires à identifier et comprendre les risques sur leur infrastructure. Elle peut intégrer de nombreux aléas et ouvrages, et son caractère systématique permet d'atteindre une bonne exhaustivité. La représentation sous forme d'arbres de défaillance est moins visuelle que des représentations cartographiques des aléas, comme dans l'approche ASTRA (2012). Cependant, elle permet une analyse de risques plus globale en tenant compte des spécificités des ouvrages et de leurs interactions. En cas de besoin, l'intégration des arbres à un système d'information géographique (SIG) est possible.

V. CONCLUSION

Les infrastructures de transport à grand linéaire (routes, autoroutes, voies ferrées) en zones de montagne sont soumises à des aléas naturels, qui vont en s'amplifiant dans le contexte actuel, et présentent des enjeux importants. Les gestionnaires de ces infrastructures ont besoin d'identifier et comprendre ces risques. De nombreuses méthodes existent à l'échelle d'un site sensible ou pour un unique aléa, mais aucune à notre connaissance ne permet d'intégrer tous les aléas et leurs impacts redoutés sur un tronçon de plusieurs kilomètres. Dans cet article, nous avons présenté une méthodologie en cours de développement pour modéliser l'ensemble des scénarios préjudiciables possibles. Ce modèle intègre les différents aléas ainsi que les spécificités des ouvrages et leurs interactions, permettant ainsi une analyse de risques globale.

L'approche comporte trois étapes : l'analyse fonctionnelle, l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets, et la construction d'arbres de défaillance pour chaque segment homogène. Cette démarche de construction d'arbres de défaillance n'est pas usuelle, et constitue un développement méthodologique innovant. Son caractère systématique permet d'atteindre une certaine exhaustivité dans les scénarios représentés.

L'applicabilité de la méthode a été testée avec succès sur un cas historique. D'autres tests sont nécessaires, notamment sur des tronçons plus longs. Les futurs développements méthodologiques du projet porteront sur la mesure du risque identifié et la priorisation dans le temps des actions de mitigation. La prise en compte des incertitudes associées sera étudiée.

REFERENCES

- Argyroudis, S.A., Mitoulis, S.A., Winter, M.G., Kaynia, A.M., 2019. Fragility of transport assets exposed to multiple hazards: State-of-the-art review toward infrastructural resilience. *Reliability Engineering & System Safety* 191, 106567. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106567>
- ASTRA, 2012. Dangers naturels sur les routes nationales : concept de risque – Méthodologie basée sur les risques pour l'évaluation, la prévention et la maîtrise des dangers naturels gravitationnels sur les routes nationales (No. ASTRA 89001, Ed. 2012 V2.20), Documentation. Bundesamt für Strassen ASTRA (Office fédéral des routes OFROU), Berne.

- Bluvband, Z., Polak, R., Grabov, P., 2005. Bouncing failure analysis (BFA): the unified FTA-FMEA methodology, in: Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2005. Proceedings. Presented at the Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2005. Proceedings., pp. 463–467. <https://doi.org/10.1109/RAMS.2005.1408406>
- Cerema, 2018. Analyse des risques appliquée aux murs en béton armé sur semelle, Références. Cerema. Bron.
- CGEDD, 2013. Vulnérabilité des réseaux d'infrastructures aux risques naturels (Rapport No. 008414–01). Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie (MEDDE), Paris.
- CGPC, 2006. Eboulement de la falaise du 24 mars 2006 sur la RN1 (route du littoral) à la Réunion (No. n° 004717-01), Les rapports. Conseil Général des Ponts et Chaussées, Paris.
- Clarke, J., O'Brien, E., 2016. A Multi-hazard Risk Assessment Methodology, Stress Test Framework and Decision Support Tool for Transport Infrastructure Networks. *Transportation Research Procedia*, *Transport Research Arena TRA2016 14*, 1355–1363. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.208>
- Dabaj, A., 2021. Analyse des risques et aide à la décision pour l'amélioration de la résilience des réseaux techniques urbains franciliens face aux crues (These de doctorat). Paris Est.
- Hassan, S.A., Amlan, H.A., Alias, N.E., Ab-Kadir, M.A., Sukor, N.S.A., 2022. Vulnerability of road transportation networks under natural hazards: A bibliometric analysis and review. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 83, 103393. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103393>
- Jaboyedoff, M., Choanji, T., Derron, M.-H., Fei, L., Gutierrez, A., Loiotine, L., Noel, F., Sun, C., Wyser, E., Wolff, C., 2021. Introducing Uncertainty in Risk Calculation along Roads Using a Simple Stochastic Approach. *Geosciences* 11, 143. <https://doi.org/10.3390/geosciences11030143>
- Kanno, H., Moriguchi, S., Tsuda, Y., Yoshida, I., Iwanaga, S., Terada, K., 2023. A method for rockfall risk quantification and optimal arrangement of protection structures along a road. *Engineering Geology* 314, 107004. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107004>
- Kaundinya, I., Nisancioglu, S., Kammerer, H., Oliva, R., 2016. All-hazard Guide for Transport Infrastructure. *Transportation Research Procedia*, *Transport Research Arena TRA2016 14*, 1325–1334. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.205>
- Mignelli, C., Lo Russo, S., Peila, D., 2012. ROckfall risk MAagement assessment: the RO.MA. approach. *Nat Hazards* 62, 1109–1123. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0137-1>
- Modarres, M., 1993. What every engineer should know about reliability and risk analysis, What every engineer should know. M. Dekker, New York.
- Mortureux, Y., 2016. Fondamentaux de l'analyse de risque, regard fiabiliste sur la sécurité industrielle, Fondation pour une culture de sécurité industrielle. ed, Les Regards sur la sécurité industrielle. FonCSI, Toulouse, France.
- Ouyang, M., 2014. Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems. *Reliability Engineering & System Safety* 121, 43–60. <https://doi.org/10.1016/j.res.2013.06.040>
- Paterna Hidalgo, A., 2015. Gestion patrimoniale des infrastructures de la ratp : développement d'un processus d'aide à la décision pour optimiser la stratégie de maintenance (These de doctorat). Paris Est.
- Petrova, E., 2020. Natural hazard impacts on transport infrastructure in Russia. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 20, 1969–1983. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1969-2020>
- Peyras, L., 2003. Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages, développement de méthodes d'aide à l'expertise (phdthesis). Doctorat spécialité Génie civil, école doctorale des sciences pour l'ingénieur, laboratoire d'études et de recherches en mécanique des structures (LERMES), Université Blaise Pascal II.
- Ruijters, E., Stoelinga, M., 2015. Fault tree analysis: A survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools. *Computer Science Review* 15–16, 29–62. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2015.03.001>
- Serre, D., 2005. Évaluation de la performance des digues de protection contre les inondations : modélisation de critères de décision dans un système d'information géographique (These de doctorat). Université de Marne-la-Vallée (1991-2019).
- SETRA, 2013. Maîtrise des risques – Application aux ouvrages d'art. Cerema (ex-Setra).
- Shahriar, A., Sadiq, R., Tesfamariam, S., 2012. Risk analysis for oil & gas pipelines: A sustainability assessment approach using fuzzy based bow-tie analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 25, 505–523. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.12.007>

- Terzi, S., Torresan, S., Schneiderbauer, S., Critto, A., Zebisch, M., Marcomini, A., 2019. Multi-risk assessment in mountain regions: A review of modelling approaches for climate change adaptation. *Journal of Environmental Management* 232, 759–771. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.100>
- van Westen, C.J., van Asch, T.W.J., Soeters, R., 2006. Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? *Bull Eng Geol Environ* 65, 167–184. <https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0>
- Villemeur, A., 1988. Surete de fonctionnement des systemes industriels: fiabilite-facteurs humains, informatisation, Direction des études et recherches d'Electricité de France (EDF). Eyrolles, Paris.
- Vuillet, M., 2012. Élaboration d'un modèle d'aide à la décision probabiliste pour l'évaluation de la performance des digues fluviales (These de doctorat). Paris Est.
- Zwingelstein, G., 1996. La maintenance basée sur la fiabilité: guide pratique d'application de la RCM, Collection diagnostic et maintenance. Hermès, Paris.
- Zwingelstein, G., 1995. Diagnostic des défaillances: théorie et pratique pour les systèmes industriels, Traité des nouvelles technologies. Hermès, Paris.