

VULNERABILITES DE LA ROUTE NATIONALE INTER-ETATS (RNIE) 3 AUX CHUTES D'ELEMENTS ROCHEUX A L'ENTREE DE LA VILLE DE TANGUIETA, (REPUBLIQUE DU BENIN, AFRIQUE DE L'OUEST)

David Sourou EDIKOU¹

Euloge OGOUWALE²

Christophe KAKI³

Ecole Doctorale Pluridisciplinaire "Espace, Culture et Développement" (EDP/FLASH), Laboratoire Pierre PAGNEY : Climat, Eau, Ecosystème et Développement (LACEEDE).

Laboratoire de Géologie, Mines et Environnement, Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences et Techniques (LGME/DST/FAST/UAC)

Université d'Abomey-Calavi (UAC).

edikousouroudavid@gmail.com

Résumé

Au Bénin, les éléments rocheux qui tombent de la chaîne montagneuse de l'Atacora, à l'entrée de la ville de Tanguiéta, atterrissent sur la Route Nationale Inter-Etats 3. Le risque correspond à la superposition spatiale et temporelle de la route (et de ses usagers) caractérisée par sa vulnérabilité et de l'aléa rocheux. L'article s'est intéressé aux vulnérabilités humaine, matérielle, fonctionnelle et structurelle de la route, évaluées au moyen d'une combinaison de la démarche d'expertise, de l'approche probabiliste et de la méthode Rockfall Hazard Rating System (RHRS) ayant initialement permis de décrire et de qualifier l'aléa rocheux sur un itinéraire de 2 333 m.

A l'entrée de la ville de Tanguiéta, la RNIE 3 présente une vulnérabilité humaine faible à moyenne au pied du haut talus artificiel et moyenne à forte au pied du grand versant, jonché de compartiments rocheux fracturés. Sa vulnérabilité matérielle est faible à moyenne. Celle fonctionnelle est moyenne à forte. En général, sa vulnérabilité structurelle est faible. En s'appuyant sur ces résultats, complétés d'autres types de vulnérabilités (psychosociologique, environnementale...) et de la perception des usagers de la route, des études de vulnérabilité quantitative permettront de définir des mesures de réduction de vulnérabilité, nécessaires pour la protection des enjeux.

Mots clés : Aléa rocheux, RNIE 3, Vulnérabilités, Réduction de vulnérabilités.

Abstract

In Benin, rocky elements that fall from the Atacora mountain range, at the entrance to the city of Tanguieta, land on the National Inter-State Road 3, built at the foot of the relief. The risk corresponds to the spatial and temporal superposition of the road (and its users) characterized by its vulnerability and

rock hazard. The article focused on the human, material, functional and structural vulnerabilities of the road, evaluated using a combination of the expertise approach, the probabilistic approach and the Rockfall Hazard Rating System (RHRS) method which initially allowed to describe and qualify the rock hazard on a route of 2 333 m.

At the entrance to the town of Tanguéta, RNIE 3 presents low to medium human vulnerability at the foot of the high artificial embankment and medium to high at the foot of the large slope littered with fractured rock compartments. Its hardware vulnerability is low to medium. The functional level is medium to strong. In general, its structural vulnerability is low. Based on these results, supplemented by other types of vulnerability (psychosociological and environmental, etc.) and the perception of road users, quantitative vulnerability studies will make it possible to define measures to reduce the vulnerability of the RNIE 3, necessary for the protection of the stakes.

Key words : *Rock hazard, RNIE 3, vulnerabilities, vulnerability reduction.*

Introduction

La vulnérabilité représente la prédisposition d'un ou plusieurs éléments exposés (enjeux) à être affectés, endommagés ou détruits du fait de la survenue d'un événement aléatoire (E. Foerster, 2009 : 7). Au-delà des perturbations qu'elles occasionnent immédiatement, les chutes de pierres et de blocs peuvent être meurtrières et avoir des conséquences économiques importantes en bloquant les infrastructures (B. Colas, 2011 : 47).

Dans cet article, il est essentiellement question de la vulnérabilité de la Route Nationale Inter-Etats (RNIE) 3, exposée, avec ses usagers et leurs biens, à l'aléa rocheux au pied de la chaîne montagneuse de l'Atacora, à l'entrée de la ville de Tanguéta, au nord-ouest du Bénin. En effet, la prise en compte du risque mouvements de terrain dans l'aménagement du territoire est devenue incontournable et passe en particulier par une amélioration constante de l'état des connaissances sur le phénomène (C. Mathon et al., 2010 : 9). Dans cette perspective, le présent article contribue à l'étude de la vulnérabilité de la RNIE 3, une nécessité pour la réduction du risque rocheux en vue de la protection des personnes et des biens à l'entrée de la ville de Tanguéta.

Selon (C. Mathon et al., 2010 : 21), l'évaluation de la vulnérabilité des enjeux passe par l'analyse du contexte naturel et anthropique, l'identification des enjeux, l'estimation des conséquences directes et indirectes d'un mouvement de terrain sur les différents types d'enjeux. Pour y arriver, dans le cas de l'enjeu linéaire (B. Colas, 2011 : 47) en étude (la RNIE 3), la méthodologie suivante est appliquée pour obtenir les résultats ci-dessous discutés.

1. Méthodologie

Une combinaison de la démarche d'expertise, de l'approche probabiliste et de la méthode Rockfall Hazard Rating System (RHRS) a été utilisée notamment pour la description, la qualification et l'évaluation de l'aléa rocheux et l'évaluation des différents types de vulnérabilités possibles (fonctionnelle, matérielle, humaine, structurelle...) pour la RNIE 3. Le tableau I présente un descriptif synthétique de la RHRS, développée aux USA pour bâtir des analyses de risque le long des réseaux routiers. Son objectif est de qualifier chaque tronçon routier homogène à partir de l'état de critères régissant l'aléa « chute de blocs » (la hauteur de talus, les mécanismes de rupture, l'intensité des phénomènes attendus, le contexte climatique local et l'historique événementiel) ainsi que les critères caractérisant la vulnérabilité du réseau (l'efficacité du fossé, la fréquence d'itinéraire, la distance de visibilité ou de décision et la largeur de la voie) pour une évaluation directe du risque (B. Colas, 2011 : 25). Chacun d'eux est affecté d'un score allant de 3 à 81 points. Les sites ayant obtenus les plus grands scores sont les plus dangereux. Ces scores ne sont pas attribués aux sites étudiés dans la présente recherche. Seule la description qualitative est privilégiée et une grille de vulnérabilités a été renseignée à partir des résultats obtenus de l'examen des paramètres guidant la vulnérabilité de la RNIE 3 vis-à-vis des processus de chutes.

Tableau I : Descriptif synthétique de la méthode RHRS (adapté de Pierson, 1990)

CATEGORIE		SCORE DU CRITERE				Echelles des scores	
		3 POINTS	9 POINTS	27 POINTS	81 POINTS		
HAUTEUR DE TALUS		7,5 m	15 m	22,5 m	>30 m	Critère géométrique (échelle locale) Vulnérabilité du réseau	
EFFICACITE DU FAUSSE		Bonne	Modérée	Limitée	Aucune		
TAUX DE FREQUENTATION VEHICULE		25% du temps	50% du temps	75% du temps	100% du temps		
DISTANCE DE DECISION		Adéquate	Modérée	Limitée	Aucune		
LARGEUR DE VOIE		21,5	15,5	9,5	3,5		
CARA	CAS I	CONDITIONS STRUCTURE	Joint discontinus, orientation favorable	Joint discontinus, orientation aléatoire	Joint discontinus, orientation défavorable	Joint continus, orientation défavorable	Critères géomécaniques (échelle de la

CAS 2	CONDITION DE FROTTEMENT	Irrégulière (imbrication mécanique)	Surface ondulée (cohésion d'imbrication)	Surface plane (frottement rocheux)	Remplissage argileux	formation homogène)
	CONDITIONS STRUCTURE	Peu de forme d'érosion différentielle	Quelques formes d'érosion différentielle	Nombreuses formes d'érosion différentielle	Majorité de formes d'érosion différentielle	
	TAUX D'ÉROSION DIFFÉRENTIELLE	Faible	Modérée	Elevée	Extrême	
TAILLE DE BLOC OU VOLUME EBOULEMENT		30 cm 2,3 m ³	60 cm 4,6 m ³	90 cm 6,9 m ³	1,2 m 9,2 m ³	
CLIMAT ET PRESENCE D'EAU SUR LE TALUS		Précipitations faibles à modérées ; pas de période de gel; pas d'eau en talus	Précipitations modérés ou courtes périodes de gel ou eau intermittente en talus	Fortes précipitations ou longue période de gel ou écoulement permanent en talus	Forte précipitation et longue période de gel ou écoulement permanent en talus et longues périodes de gel	Critères météorologiques/ hydrogéologiques (échelle locale)
HISTORIQUE CHUTE DE BLOCS		Peu d'événements	Quelques événements	Nombreux événements	Très nombreux événements	Contexte événementiel (échelle de la formation homogène)

Source : Rapport BRGM RP-58974-FR (B. Colas, 2011 : 26)

2. Contexte naturel et anthropique

2.1. La RNIE 3 dans son milieu naturel à l'entrée de la ville de Tanguiéta

La RNIE 3, longue de 456 km, est une route béninoise de direction sud-nord, allant de Dassa-Zoumé à la frontière burkinabé. Elle traverse les départements des Collines, de la Donga et de l'Atacora. Dans le département de l'Atacora, notamment à quelques kilomètres du centre-ville de Tanguiéta, on observe une route sinueuse (photo 1) dont le trajet est commandé par les contraintes du milieu naturel dominé par la chaîne montagneuse de l'Atacora, haute de 400 à 650 m d'altitude en moyenne.

L'image Google Earth 2018 de la photo 1 permet d'observer de loin le tracé de la RNIE 3, au pied de la chaîne de l'Atacora, d'orientation NNE-SSW.

Photo 1 : RNIE 3, au pied de la chaîne de l'Atacora, à l'entrée de Tanguiéta



Source : Image Google Earth, 2018

La chaîne de l'Atacora, observée sur cette photo satellite, se prolonge au Togo et au Ghana d'une part et au Niger de l'autre (K. S. Adam et M. Boko, 1983 : 15). Elle appartient au bassin voltaïen du primaire et est formée de quartzites et de schistes exposés au climat atacorien, caractérisé par des températures plus fraîches à cause de l'altitude. Elle subit des orages plus fréquents, des précipitations liées, à la fois à l'arrivée du front de mousson et aux influences orographiques. La température moyenne annuelle est de 28°C tandis que l'humidité varie de 27,1 % à 82,8 %. C'est l'une des zones les plus arrosées du Bénin. Il y tombe jusqu'à plus de 1 300 mm de pluie par an (K. S. Adam et M. Boko, 1983 : 21). Organisé autour de la Pendjari, et de ses affluents, le réseau hydrographique est dense, avec les chutes d'eau spectaculaires de Tanguiéta, Tanongou etc. La plupart des cours d'eau qui arrosent le Bénin prennent leur source dans l'Atacora, considérée comme le château d'eau du pays. L'aléa rocheux, en tant que facteur physique à l'origine du risque est décrit et qualifié sur 2 333 m de route encerclés au rouge sur la photo 1.

2.2. Description et qualification de l'aléa rocheux vis-à-vis de la RNIE 3

Tableau II : Aléas rocheux décrits et qualifiés sur 2 333 m de la RNIE 3

Tronçons	Breve description et qualification de l'aléa	Images Caractéristiques
Tronçon 1 : (90 m)	Talus artificiel haut de plus de 20 m, affleurant la RNIE 3 sur 90 m environ, muni d'une grande surface de discontinuités et de traces de dents d'engin de chantier. Au sommet, poussent des touffes d'herbes et de petits arbres dont les racines s'enfoncent dans les fissures. L'occurrence du phénomène est plus envisageable que sa non-occurrence. Il s'agit alors d'un aléa fort	
Tronçon 2 : (513 m)	Grand versant à pente très forte, affleurant la RNIE 3 sur 513 m, composé de compartiments rocheux fracturés, disposés en bancs pouvant donner lieu à un glissement banc sur banc. Ici, l'occurrence du phénomène est normale. C'est un aléa diffus très fort	
Tronçon 3 : (516 m)	Versant de 516 m affleurant la RNIE 3, à pente faible recouvert de formations meubles et dépourvu de blocs. La non-occurrence du phénomène est normale. Son occurrence serait exceptionnelle. C'est un aléa nul à négligeable	
Tronçon 4 (168 m)	Versant de 168 m affleurant la RNIE 3, à pente moyenne avec une formation rocheuse compacte. L'occurrence du phénomène est équivalente à sa non-occurrence. C'est un aléa moyen	
Tronçon 5 (421 m)	Versant de 421 m, à pente faible avec des blocs disposés au sommet. Cependant, la non-occurrence du phénomène est normale. Son occurrence serait exceptionnelle. C'est un aléa nul à négligeable	
Tronçon 6 : (625 m)	Versant à pente assez forte, affleurant la RNIE 3 sur 625 m environ avec des blocs groupés ou isolés jusqu'au sommet. Les traces de l'érosion différentielle y sont observables. Ici, l'occurrence du phénomène est plus envisageable que sa non-occurrence. C'est un aléa fort	

Source : Travaux de terrain (D. S. Edikou, 2020)

Le tableau II présente des images caractéristiques pour les six tronçons découpés sur l'itinéraire en étude. L'aléa rocheux est brièvement décrit et qualifié sur chaque tronçon en fonction de la susceptibilité ou de la composante spatiale des facteurs (de prédisposition) favorisant la survenue d'instabilité. Cinq tronçons, longs de 2 243 m sont en versant et le sixième, long de 90 m, est en talus. Le phénomène est donc plus étendu en versant qu'en talus. Les blocs issus de versant se propagent sur le versant avant d'atteindre ou non la voie. Par contre, les blocs qui se détachent du talus immédiat à la route y tombent directement (B. Colas, 2011 : 15). L'espace frontalier bénino-burkinabé est polarisé par la ville de Tanguiéta qui constitue le point d'entrée et de sortie du Bénin. C'est par cette ville que le Burkina-Faso importe, par la RNIE 3, ses produits du port de Cotonou. Les échanges concernent surtout les hydrocarbures et les produits vivriers (Ministère du Cadre de Vie et du Développement durable, 2017 : 81). Le trafic par la RNIE 3 devient de plus en plus important. Cependant, sa construction au pied de ce massif accidenté, avec une tranchée de quatre-vingt-dix mètres environs, donnant naissance à deux talus artificiels à l'entrée de la ville de Tanguiéta, l'expose à l'aléa rocheux auquel elle est diversement vulnérable, avec ses usagers et leurs biens, du fait des chutes d'éléments rocheux atteignant la route comme ce fut le cas des pierres et blocs, montrés par les photos de la planche 1.



Planche 1 : Véhicules et obstacles rocheux sur la RNIE 3, à l'entrée de la ville de Tanguiéta

Prise de vues : R. Tiando (2012)

On observe sur les deux photos de la planche, des véhicules en transit sur la RNIE 3, encombrée par des éléments rocheux tombés du massif de l'Atacora le 12 mai 2012. Les premiers témoins alertent les passagers

notamment, ceux venant de Natitingou, en raison de la courbure de la voie débouchant immédiatement sur les éléments rocheux éboulés. Sans leur signal, le petit véhicule et même le camion-citerne, tous sortant de la courbure et allant vers le centre-ville de Tanguiéta risquent de les percuter. Toutefois, en l'absence de ces personnes, le conducteur habile pourrait au moyen de manœuvres conséquentes profiter de la partie de la voie non obstruée par les blocs. C'est ainsi que la largeur de la voie entre en compte pour l'évaluation mais, le volume ou la taille des éléments tombés est déterminante ; des blocs plus gros et volumineux obstrueraient totalement la voie.

3. Enjeux exposés aux instabilités rocheuses

L'exposition d'un enjeu, encore appelée probabilité de présence (Projet National C2ROP, 2020 : 15) est la probabilité spatio-temporelle qu'il se trouve dans l'emprise d'un phénomène naturel, ici les chutes d'éléments rocheux. Elle constitue l'élément principal de la vulnérabilité (E. Foerster, 2009 : 16). Il existe des enjeux matériels, humains, socio-économiques et environnementaux dans la zone d'emprise de l'aléa rocheux en étude. On peut respectivement citer, en plus de la RNIE 3 et ses usagers (piétons et conducteurs) avec leurs biens (matériel roulant et objets ou marchandises transportées), les points à caractère touristique, les ressources naturelles et la rivière longeant la route.

4. Vulnérabilités de la RNIE 3 à l'aléa rocheux à l'entrée de la ville de Tanguiéta

La vulnérabilité représente le degré d'endommagement potentiel d'un élément exposé à un phénomène donné (C. Mathon et al., 2010 : 21). Celle de la RNIE 3 peut se traduire par le degré de dommages qu'elle peut subir vue sa prédisposition ou son exposition et sa sensibilité aux chutes d'éléments rocheux. Elle s'explique aussi par l'ensemble des facteurs de fragilité qui contribuent à la réalisation des dommages en cas d'instabilités rocheuses et à l'incapacité de lui faire face (A. Crévolin et R. Gaucher, 2015 : 42).

4.1. Examen des critères guidant l'aléa rocheux et la vulnérabilité de la RNIE 3

L'examen des paramètres guidant l'aléa et de ceux guidant la vulnérabilité

a permis de reprendre, comme ci-après, le tableau descriptif de la méthode RHRS, respectivement pour le tronçon (1) de talus (tableau III) et pour le tronçon (2) versant (tableau IV).

Tableau III : Examen des critères RHRS guidant l'aléa et la vulnérabilité au niveau du talus (tronçon 1)

CATEGORIE		DESCRIPTION SOMMAIRE DES PARAMETRES	
HAUTEUR DE TALUS		La hauteur du talus varie sur toute sa longueur. Elle atteint les 20 m au niveau de l'axe central	
EFFICACITE DU FOSSE		Limitée pour les pierres mais aucune pour éléments rocheux plus volumineux, des blocs	
TAUX DE FREQUENTATION VEHICULE		25% du temps	
DISTANCE DE DECISION		Limitée à aucune en raison de la courbure de la voie débouchant sur le talus à l'entrée de la ville de Tanguéta	
LARGEUR DE VOIE		8 m	
CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES	CAS 1	CONDITIONS STRUCTURE	Joint continu, orientation défavorable
		CONDITION DE FROTTEMENT	Imbrication irrégulière caractérisée par une surface plane plus étendue que celle ondulée. Quelques points de remplissage argileux sont également observés. Il y a donc possibilité de frottement rocheux ou de glissement entre deux surfaces de contact, actuellement limité par la résistance au cisaillement développée sur les discontinuités
	CAS 2	CONDITIONS STRUCTURE	Quelques formes d'érosion différentielle
		TAUX D'EROSION DIFFERENTIELLE	Faible à Modéré
TAILLE DE BLOC OU VOLUME EBOULEMENT		Des blocs de tailles ou de volumes divers, pouvant dépassé le mètre ou 9 m ³ , découpés par les familles de joints	

CLIMAT ET PRESENCE D'EAU SUR LE TALUS	1 200 à 1 300 mm de précipitations caractérisées avec ruissellement et infiltration d'eau dans les espaces de discontinuités
HISTORIQUE CHUTE DE BLOCS	Quelques événements connus

Source : Rapport BRGM RP-58974-FR (B. Colas, 2011) et Travaux de terrain (D. S. Edikou, 2020)

L'examen des critères RHRS guidant l'aléa et la vulnérabilité au niveau du talus en étude confirme la description initiale et la qualification d'aléa fort vis-à-vis de la RNIE 3 au pied du talus artificiel, le plus élevé, à l'entrée de la ville.

***Tableau IV :** Examen des critères RHRS guidant l'aléa et la vulnérabilité au niveau du versant (tronçon 2)*

CATEGORIE		DESCRIPTION SOMMAIRE DES PARAMETRES	
HAUTEUR DE TALUS		0 m. Il s'agit d'un versant de falaise rocheuse	
EFFICACITE DU FOSSE		Limitée à aucune	
TAUX DE FREQUENTATION VEHICULE		25% du temps	
DISTANCE DE DECISION		Limitée sur la partie droite aucune à ses extrémités en raison de la courbure de la voie à ses endroits	
LARGEUR DE VOIE		8 m	
CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES	CAS 1	CONDITIONS STRUCTURE	Joint continu, orientation défavorable à la stabilité
		CONDITION DE FROTTEMENT	Surface ondulée (cohésion d'imbrication) avec érosion et altération puis remplissage argileux par endroit. Donc degré d'imbrication des surfaces de joints en modification.
	CAS 2	CONDITIONS STRUCTURE	Nombreuses formes d'érosion différentielle avec parement rocheux annuellement modifié
		TAUX D'EROSION DIFFERENTIELLE	Elevée

TAILLE DE BLOC OU VOLUME EBOULEMENT	Indices d'intensité élevée à très élevée ; le volume unitaire pouvant se propager est supérieur ou égal à 1 m ³ , et pouvant dépasser 10 m ³ . Des volumes totaux exceptionnels sont aussi envisageables.
CLIMAT ET PRESENCE D'EAU SUR LE TALUS	1 200 à 1 300 mm de pluies avec de fortes précipitations avec ruissellement d'eau sur le talus et infiltration dans les espaces de discontinuités
HISTORIQUE CHUTE DE BLOCS	Quelques événements connus

Source : Rapport BRGM RP-58974-FR (Colas, 2011) et Travaux de terrain (D. S. Edikou, 2020)

L'examen des critères guidant l'aléa et la vulnérabilité au niveau du versant en étude confirme la description initiale et la qualification d'aléa diffus, fort à très fort vis-à-vis de la RNIE 3. Des volumes unitaires de compartiments rocheux fracturés, statiquement stables (L. Effendiantz et *al.*, 2004 : 39) sur ce versant et pouvant se propager en cas d'instabilité, dépassent le volume de 10 m³, suffisant pour occasionner une destruction du gros œuvre, une ruine certaine et une perte de toute intégrité structurelle (Collectif : groupe de Travail MEZAP, 2021 : 29). En effet, étant donné la rapidité, la soudaineté et le caractère souvent imprévisible de ces phénomènes, les instabilités rocheuses constituent des dangers pour les vies humaines, même pour de faibles volumes (chutes de pierres). Les chutes de blocs, et a fortiori les éboulements, peuvent causer des dommages importants aux structures pouvant aller jusqu'à leur ruine complète, d'autant plus que l'énergie est grande (L. Besson et *al.*, 1999 : 13).

En tenant compte de la description et de la qualification de l'aléa chute d'éléments rocheux vis-à-vis de la RNIE 3 d'une part et d'autre part de l'examen des paramètres guidant l'aléa rocheux vis-à-vis de la RNIE 3 et de ceux guidant la vulnérabilité de la RNIE 3 aux instabilités rocheuses, la vulnérabilité de la RNIE 3 est humainement, matériellement, fonctionnellement et structurellement évaluée comme ci-après à l'entrée de la ville de Tanguiéta.

4.2. Vulnérabilité humaine de la RNIE 3 à l'entrée de Tanguiéta

La « vulnérabilité humaine » de la route concerne les dommages potentiels aux personnes. Elle fait référence à la sécurité des personnes, y compris celles qui travaillent à la sécurisation. C'est la première préoccupation des usagers et des acteurs de la gestion du risque. (Projet National C2ROP, 2020 : 24).

La vulnérabilité humaine de la route résulte d'accidents « directs » produits par atterrissage de blocs sur un véhicule qui roule ou qui stationne le long du réseau ou « indirects » par accidents liés à la présence d'éléments rocheux éboulés sur la chaussée. Pour cet aspect, l'enjeu n'est plus le réseau proprement mais son « contenu » à savoir les usagers, qui eux-mêmes sont mobiles sur la route (B. Colas, 2011 : 47).

Aucun véhicule impliqué dans un accident occasionné par une chute d'éléments rocheux atteignant la RNIE 3 n'a été enregistré. Aucun piéton n'a été non plus touché lors des événements connus des populations locales. Toutefois, vu l'importance du facteur physique menaçant la route, l'absence du panneau de signalisation A 19 et de panneau d'étendue associé, l'importance des usagers de la route ou la fréquentation d'itinéraire, les conditions de mobilité (la vitesse autorisée, la largeur de voie, sa courbure, la visibilité...), la vulnérabilité humaine de la route peut être qualifiée de moyenne à forte.

4.3. Vulnérabilité matérielle de la RNIE 3 à l'entrée de Tanguiéta

La vulnérabilité matérielle de la route se rapporte aux dommages potentiels physiques subis par le réseau routier. Dans ce cas, on s'intéressera en plus de la dégradation de la chaussée, à la destruction de quelques ponts de l'itinéraire en étude. On parle ici de dommages « directs » résultant de l'impact de roche sur une structure (B. Colas, 2011 : 47).

Aucun ouvrage ou pont par exemple n'a été détruit par les blocs tombés sur l'itinéraire en étude. Seule une dégradation mineure, réparable, de la chaussée a été effective aux points d'impact des blocs éboulés. La RNIE 3 est donc faiblement vulnérable matériellement au niveau des tronçons étudiés pour les événements passés. Mais, des chutes d'éléments de grands volumes pourraient détruire des ponts drainant les eaux qui dévalent les pentes vers la rivière longeant la route et accroître ainsi la vulnérabilité matérielle de la route.

4.4. Vulnérabilité fonctionnelle de la RNIE 3 à l'entrée de Tanguiéta

La vulnérabilité fonctionnelle de la route se dit pour ses pertes de fonction. Pour les chutes de blocs sur les routes, la notion de vulnérabilité fonctionnelle se décline par l'obstruction totale ou partielle de la voie suite à l'éboulement (B. Colas, 2011 : 47) comme ce fut le cas de l'éboulement du 19 mai 2012, présenté plus haut par les photos de la planche 1. La route a été dégradée et le trafic perturbé pendant quelques heures avant le dégagement et le nettoyage de la chaussée par le service des Travaux Publics (TP).

La survenue d'événements de volumineux élevés occasionnerait une vulnérabilité fonctionnelle importante de la route en raison de son statut de route principal d'accès à la ville de Tanguiéta et de Route Nationale Inter-Etats. Dans ce cas, l'obstacle pourrait être contourné avec l'allongement des temps de trajet par la septième Route Nationale (RN 7), la route de Boukoumbé, longue de 105 km à partir de Natitingou pour Tanguiéta au lieu de 51 km directement. Cette dernière est aussi exposée au risque rocheux et n'est pas épargnée des mouvements de terrain pouvant perturber sa fonction. On peut donc retenir que la RNIE 3 présente une vulnérabilité fonctionnelle ou socio-économique moyenne à forte à l'entrée de la ville de Tanguiéta.

4.5. Vulnérabilité structurelle de la RNIE 3 à l'entrée de Tanguiéta

La vulnérabilité structurelle se dit de la capacité d'une infrastructure ou organisation à atténuer ou amplifier les perturbations liées à sa conception, son architecture, etc. Elle s'applique essentiellement aux infrastructures de types « réseaux ». Sa prise en compte peut avoir pour objectif d'intervenir sur les schémas directeurs pour intégrer les risques naturels dans la priorisation du réseau (Projet National C2ROP, 2021 : 9). La vulnérabilité structurelle ou vulnérabilité du réseau questionne beaucoup plus en amont la qualité rationnelle du réseau, ses fragilités, l'adéquation avec les besoins... (Club « Risque rocheux », 2017 : 8). Une dégradation structurelle est une dégradation majeure d'éléments structuraux (par exemple, un tablier de pont détruit). La réparation suffit pour une dégradation fonctionnelle tandis que la reconstruction partielle ou totale est nécessaire pour une dégradation structurelle (N. Flouest et al., 2014, p. 30). Depuis sa construction, en 2003, la RNIE 3 n'a subi aucune dégradation structurelle portée à notre connaissance, du moins

sur l'itinéraire délimité pour l'étude au pied du massif d'où seraient issus des éléments rocheux l'ayant occasionnée. Toutefois, un tel endommagement n'est pas à ignorer, vue l'existence sur le versant de compartiments rocheux susceptibles de l'occasionner. En dehors de quelques travaux de réduction de vulnérabilité notamment l'adoucissement des pentes, effectués à la construction de la route, l'efficacité du fossé, "limitée à aucune" et l'absence de dispositifs de protection contre les chutes d'éléments rocheux peuvent expliquer la vulnérabilité structurelle faible à moyenne de la RNIE 3 à l'entrée de Tanguiéta.

Le tableau V présente une synthèse de l'évaluation des vulnérabilités de la RNIE 3 aux instabilités rocheuses à l'entrée de la ville de Tanguiéta.

Tableau V : Grille de vulnérabilités de la RNIE 3 aux chutes d'éléments rocheux à l'entrée de la ville de Tanguiéta

Types de vulnérabilité de la RNIE 3	Au niveau du talus			Au niveau du versant		
	Faible	Moyenne	Forte	Faible	Moyenne	Forte
Vulnérabilité humaine						
Vulnérabilité matérielle						
Vulnérabilité fonctionnelle						
Vulnérabilité structurelle						

Source : Travaux de terrain, D. S. Edikou (2017)

A l'entrée de la ville de Tanguiéta, la RNIE 3 présente une vulnérabilité matérielle faible à moyenne et une vulnérabilité fonctionnelle moyenne à forte. Humainement, elle présente une vulnérabilité faible à moyenne au pied du talus et moyenne à forte au pied du grand versant. Toutefois, en raison de la variation de la hauteur du talus sur sa longueur en bordure de la route, une même vulnérabilité peut être de niveau faible, moyen et/ou fort. Au pied du versant, les niveaux de vulnérabilités peuvent également varier en fonction des volumes plus importants observés sur place et au sommet du relief. En réalité, la vulnérabilité est difficile à qualifier dans le cas des mouvements de terrain, car les interactions entre

les éléments exposés et les phénomènes qui peuvent les endommager sont complexes (C. Mathon, 2010 : 20).

5. Discussion

Les études de vulnérabilité sont tributaires de la capacité à caractériser l'aléa, du moins, dans sa dimension spatiale et les analyses de vulnérabilité et d'aléa sont forcément liées (F. Leone, 1996 : 123). Ainsi, dans cet article, l'évaluation de la vulnérabilité de la RNIE 3 aux instabilités rocheuses issues de la chaîne montagneuse de l'Atacora a été faite (au moyen d'une combinaison de la démarche par expertise, de l'approche probabiliste et de la méthode RHRS) après description et qualification de l'aléa rocheux suivies d'une identification des enjeux exposés conformément aux différentes étapes d'évaluation de vulnérabilité (analyse du contexte naturel et anthropique, identification des enjeux, estimation des conséquences directes et indirectes d'un mouvement de terrain sur les différents types d'enjeux) proposées par C. Mathon et *al.*, (2010 : 21).

Selon E. Foerster (2009 : 19), les méthodologies d'évaluation de vulnérabilité utilisent soit des approches déterministes permettant in fine de quantifier des probabilités de dommage, ou des approches qui décrivent la vulnérabilité en termes qualitatifs (« faible », « modérée », « élevée »). Dans le cas présent, bien que les critères de vulnérabilités de la RHRS adoptée pour l'étude soient examinés, les scores (notés de 3 à 81) n'y ont pas été affectés ou valorisés pour une évaluation quantitative de la vulnérabilité de la route. Seule, l'évaluation qualitative a été privilégiée. Elle constitue pour la RNIE 3, sur l'itinéraire délimité à l'entrée de Tanguiéta, un premier essai sur lequel s'appuieront de futures études de vulnérabilité suivant l'approche quantitative dont la finalité est d'aider les décideurs à formuler leur politique de prévention, suivant des techniques d'évaluation qui visent à mettre en balance les répercussions de catastrophes potentielles et les coûts entraînés par la réalisation de mesures visant à en limiter les effets (F. Leone, 1996 : 23).

En dehors des vulnérabilités humaine, matérielle, fonctionnelle et structurelle évaluées pour la RNIE 3, d'autres types de vulnérabilités ayant préoccupé le Club « Risque Rocheux » (2017 : 8) et les Rencontres MOA « Risque Rocheux » (2017 : 12), peuvent être prises en compte dans l'évaluation. Il s'agit de la vulnérabilité psychosociologique (liée au contexte historique des événements, des accidents) et de la vulnérabilité

environnementale définie par les conséquences écologiques d'un événement (y compris la déviation). Par ailleurs, l'évaluation de la vulnérabilité aux instabilités rocheuses de la RNIE 3 n'a pas pris en compte la perception du risque par la population ou les usagers de la route.

Conclusion

L'évaluation des vulnérabilités est une question complexe de manière générale dans le domaine des risques, en particulier des risques naturels (Projet National C2ROP, 2021 : 31). La RNIE 3 est, avec ses usagers et leurs biens, vulnérable aux mouvements rocheux issus du massif de la chaîne de l'Atacora, à l'entrée de la ville de Tanguiéta. Des études spécifiques de vulnérabilités notamment quantitatives pourront compléter les résultats obtenus pour mieux comprendre le phénomène et organiser la réduction de la vulnérabilité des enjeux en s'appuyant sur la surveillance des sites. Retenons avec F. Leone (1996 : 166) que l'analyse des différents facteurs de vulnérabilité nécessite une connaissance approfondie dans une approche pluridisciplinaire des problèmes.

Bibliographie

Adam Kolawolé Sikirou et Boko Michel (1993), *Le Bénin*, Cotonou, Flamboyant.

Ministère du Cadre de Vie et du Développement durable (2017), *Agenda Spatial du Bénin*, Cotonou.

Besson Liliane et al., (1999), *Plans de prévention des risques naturels (PPR), Risques de mouvements de terrain, « Guide méthodologique »*, Paris, La documentation française.

Club « Risque Rocheux » (2017), La prise en compte des vulnérabilités dans l'évaluation du risque, « papier de recherche » rocheux » Grenoble.

Colas Bastien (2011), *Hiérarchisation du risque de chute de blocs, RD 713 réseau routier départemental du Gard, « Rapport BRGM/RP-58975-FR »*, France, BRGM.

Collectif (groupe de Travail MEZAP : Méthode de Zonage de l'Aléa chute de Pierre) (2021), *Guide technique MEZAP. Caractérisation de l'aléa rocheux dans le cadre d'un Plan de Prévention des Risques Naturels (PPRn) ou d'un Porter a connaissance (PAC)*. France, BRGM.

- Crévolin Amandine et Gaucher Romain** (2015), *Guide pratique de la gestion des risques naturels en montagne*, Département des Hautes-Alpes, Bresson
- Effendiantz Laurent et al.**, (2004), *Les études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux*, « Guide technique », LCPC, Paris Cedex 15
- Flouest Nicolas et al.**, (2014), « *Versants rocheux : Phénomènes, aléas, risques et méthodes de gestion* » *Guide pratique* », La Défense cedex, France.
- Foerster Evelyne** (2009), *Vulnérabilité : état de l'art sur les concepts et méthodologies d'évaluation* « Rapport final », France, BRGM.
- Leone Frédéric** (1996), *Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain*. « Thèse », Université de Grenoble.
- Mathon Christian, et al.**, (2010), *Classeur "Le risque mouvement de terrain en Provence-Alpes-Côte d'Azur"*, Région, DREAL PACA et BRGM.
- Projet National C2ROP [Chutes de blocs, Risques Rocheux, Ouvrages de Protection]** (2021), *Prise en compte du risque rocheux par les Maîtres d'ouvrage gestionnaires d'infrastructures*, Bron, Cerema.
- Projet National C2ROP**, 2020, *Caractérisation de l'aléa éboulement rocheux- Etat de l'art*. Bron, Cerema.
- Rencontres MOA « Risque Rocheux »** (2017), *Eléments d'une quantification du risque rocheux*, « papier de recherche », Grenoble