

UN CADRE METHODOLOGIQUE POUR DONNER LA PRIORITE A DES TRONÇONS ROUTIERS CRITIQUES EN VUE D'INVESTISSEMENTS DANS LA RESILIENCE CLIMATIQUE

P. Sohounou, D. Soto, C. Vignote & K. Selouane
Resalliance (by Sixense), Nanterre, France
philippe.sohounou@resalliance.com

RESUME

Avec le changement climatique, les impacts des aléas naturels (tels que les inondations, les chutes de neige et les glissements de terrain) sur les réseaux routiers et la mobilité pourraient s'aggraver. Il est donc plus que jamais essentiel de renforcer la résilience des infrastructures routières face aux aléas naturels. Pour atteindre cet objectif, la conception, l'exploitation et la maintenance des infrastructures routières doivent s'appuyer sur des données et des modèles relatifs au climat, aux systèmes de transport, aux infrastructures et à l'aménagement du territoire. En particulier, les opérateurs de transport et les autorités publiques devraient analyser ces données et modèles pour identifier les routes critiques (c'est-à-dire les routes dont l'indisponibilité entraînerait les impacts les plus élevés sur le système de transport et le territoire environnant), qui devraient être prioritaires pour les investissements de renforcement de la résilience. Cet article présente un cadre méthodologique permettant d'identifier les sections critiques dans un réseau routier à l'aide de données sur les aléas climatiques, les infrastructures, les transports et l'occupation des sols. Ces données sont analysées et combinées pour obtenir un indice de criticité composite qui intègre trois aspects de la criticité d'un segment routier : (i) la vulnérabilité de l'infrastructure routière, (ii) la résilience de l'infrastructure routière, et (iii) la criticité des services territoriaux supportés par l'infrastructure routière. Par conséquent, le cadre proposé fournit une méthode complète pour identifier les segments de route qui doivent être considérés comme prioritaires pour les investissements en matière de résilience climatique. Deux études de cas sont utilisées pour illustrer le cadre méthodologique proposé.

1. INTRODUCTION

Les risques naturels, tels que les inondations, les chutes de neige et les glissements de terrain, peuvent endommager et obstruer les infrastructures routières, entraînant des coûts de réparation et des interruptions de service qui ont un impact sur la société et l'économie. Le ministère britannique des transports [1] a estimé que les inondations de juillet 2007 à Londres ont provoqué l'immobilisation de près de 10 000 personnes, tandis que les coûts de réparation ont été estimés entre 40 et 60 millions de livres sterling. De même, les dommages constatés sur les infrastructures de transport à Ouagadougou (Burkina Faso) lors des inondations de septembre 2009 ont été estimés à 4,9 milliards de francs CFA (7,5 millions €) par la Banque mondiale [2]. Les dégâts ont également coupé l'accès à plusieurs quartiers pendant des jours (et des semaines dans certains cas). Par ailleurs, les impacts des risques climatiques sur les réseaux routiers et la mobilité pourraient s'aggraver dans de nombreuses régions du monde avec le changement climatique [3].

Pour réduire les impacts de ces perturbations sur la société, les opérateurs de transport et les autorités publiques doivent identifier les routes critiques (c'est-à-dire les routes dont l'indisponibilité entraînerait les impacts les plus importants sur le système de transport et le

[1] XVIe Congrès mondial sur la Viabilité hivernale et la Résilience routière

territoire environnant), qui devraient être prioritaires pour les investissements de renforcement de la résilience. Cet article introduit un cadre méthodologique permettant d'identifier les segments de route critiques dans un réseau routier en utilisant trois critères : (i) la vulnérabilité de l'infrastructure routière, c'est-à-dire la propension de l'infrastructure à subir des dommages dus à un aléa, (ii) la résilience de l'infrastructure routière, c'est-à-dire la capacité de l'infrastructure à supporter et à se remettre des perturbations, et (iii) la criticité des services territoriaux supportés par l'infrastructure routière. Bien que des méthodologies prenant en compte ces différents critères aient été proposées dans la littérature [4–9], elles considèrent rarement ces trois concepts dans une même approche. Cela peut s'expliquer par deux raisons. Premièrement, l'application du concept de résilience aux infrastructures routières est relativement nouvelle. Deuxièmement, la prise en compte de ces trois concepts nécessite un ensemble diversifié de compétences (modélisation climatiques, analyse des systèmes de transport, analyse urbaine, analyse des risques et de la résilience) et de données (données sur les risques climatiques, données sur les infrastructures, données sur les systèmes de transport et données sur l'utilisation des sols). Pourtant, l'intégration de la vulnérabilité, de la résilience et de la criticité territoriale de l'infrastructure routière dans une méthodologie unique est cruciale pour aider les opérateurs de transport et les autorités publiques à optimiser l'allocation des budgets pour les investissements dans la résilience climatique.

Le présent article est structuré comme suit. La méthodologie est présentée dans la section 2 et appliquée à deux études de cas—un réseau autoroutier en France et un réseau urbain à Ouagadougou—dans la section 3. Enfin, une discussion et des conclusions sont présentées dans la section 4.

2. CADRE METHODOLOGIQUE

2.1. Division du réseau routier en sections de route

Les réseaux routiers sont composés d'infrastructures (ponts, intersections, impasses, sections de rue, etc.) qui interagissent ensemble pour fournir des services de mobilité, c'est-à-dire permettre aux usagers d'atteindre la destination de leur choix en utilisant différentes options de transport (voiture privée, transports publics, etc.). La métrologie présentée requiert la division du réseau à analyser en segments (ou sections) de route. Cette division peut se faire selon plusieurs critères en fonction des caractéristiques du réseau et des objectifs des parties prenantes. À titre indicatif, les réseaux routiers urbains peuvent généralement être divisés en éléments fonctionnels, en utilisant les intersections et les impasses pour diviser le réseau en segments. Les réseaux d'autoroutes peuvent être divisés en éléments fonctionnels en utilisant les sorties, les entrées et les échangeurs pour diviser les réseaux en segments. Le présent cadre vise ensuite à identifier les segments de route les plus critiques parmi ces segments.

2.2. Composants de criticité

Pour évaluer la criticité des différents segments d'un réseau routier donné, le cadre proposé prend en compte trois éléments : la vulnérabilité de l'infrastructure routière, la résilience de l'infrastructure routière et la criticité des services territoriaux supportés par l'infrastructure routière.

Vulnérabilité de l'infrastructure routière

La vulnérabilité de l'infrastructure routière mesure le degré auquel l'infrastructure est susceptible de subir des dommages en raison de son exposition à un aléa. La vulnérabilité de l'infrastructure est la combinaison de son exposition (c'est-à-dire la nature et le degré

d'exposition d'un système à des variations climatiques importantes) et de sa sensibilité (c'est-à-dire l'amplitude des dommages potentiels qui pourraient être causés par un aléa climatique donné).

L'évaluation de la vulnérabilité des infrastructures (V) nécessite des données sur l'aléa climatique (emplacement, intensité, fréquence et durée) ainsi que sur l'emplacement des infrastructures et leur sensibilité à un aléa donné (qui dépend des caractéristiques physiques des infrastructures, par exemple l'élévation de la route par rapport au terrain naturel).

Résilience de l'infrastructure routière

La résilience de l'infrastructure routière mesure la capacité de l'infrastructure à continuer à assurer ou à récupérer rapidement sa fonctionnalité (c'est-à-dire à permettre le passage des usagers) lorsqu'elle est endommagée ou perturbée. L'évaluation de la résilience de l'infrastructure routière nécessite des données sur l'évolution prévue de la vulnérabilité de l'infrastructure (amplitude des dommages physiques et opérationnels) au cours d'un processus de récupération. Par exemple, l'évolution du niveau des eaux sur la chaussée après de fortes précipitations donne une indication de la capacité de l'infrastructure à absorber et à traiter l'excès d'eau. L'évaluation de la résilience peut également prendre en compte la capacité et la rapidité des opérateurs de transport à réparer et à dégager les infrastructures routières à la suite d'aléas climatiques (par exemple, la neige).

En d'autres termes, l'indice de résilience (R) devrait être une extension de l'indice de vulnérabilité dans le temps. Par exemple, dans l'étude de cas présentée ci-dessous, l'indice de vulnérabilité mesure la hauteur des eaux sur la chaussée tandis que l'indice de résilience considère l'évolution de cette hauteur d'eau dans le temps.

Criticité des services territoriaux supportés par l'infrastructure routière

Dans un réseau routier, certaines sections de route sont plus importantes que d'autres en fonction des services de mobilité qu'ils supportent (par exemple, l'accès à des zones résidentielles est moins crucial que l'accès à des établissements de santé). En pratique, l'importance relative des segments routiers est liée au fonctionnement du territoire [10]. Le présent cadre méthodologique considère et quantifie cette importance relative à l'aide d'un indice de criticité territoriale (TCr), qui prend en compte plusieurs critères tels que le trafic et l'utilisation du sol autour de l'infrastructure routière.

2.3. Quantification et combinaison des éléments de criticité

Pour aider les décideurs à sélectionner les tronçons routiers les plus critiques d'un réseau en vue d'investissements dans la résilience climatique, les trois éléments mentionnés ci-dessus doivent tous être pris en compte. À cette fin, un indice composite de criticité des tronçons routiers (CCr) peut être calculé en utilisant des indices qui quantifient la vulnérabilité, la résilience et la criticité territoriale associées aux tronçons routiers. La formule mathématique utilisée pour combiner les trois indices doit être adaptée à l'étude de cas pour obtenir une bonne dispersion des scores et refléter les préférences des parties prenantes pour le critère de vulnérabilité, de résilience ou de criticité territoriale. La Figure 1 présente un résumé du processus et des données nécessaires pour appliquer le cadre méthodologique. Il est à noter que, compte tenu de l'aspect spatial des données climatiques et territoriales, les systèmes d'information géographique (SIG) sont des moyens naturels pour mettre en œuvre cette méthodologie.

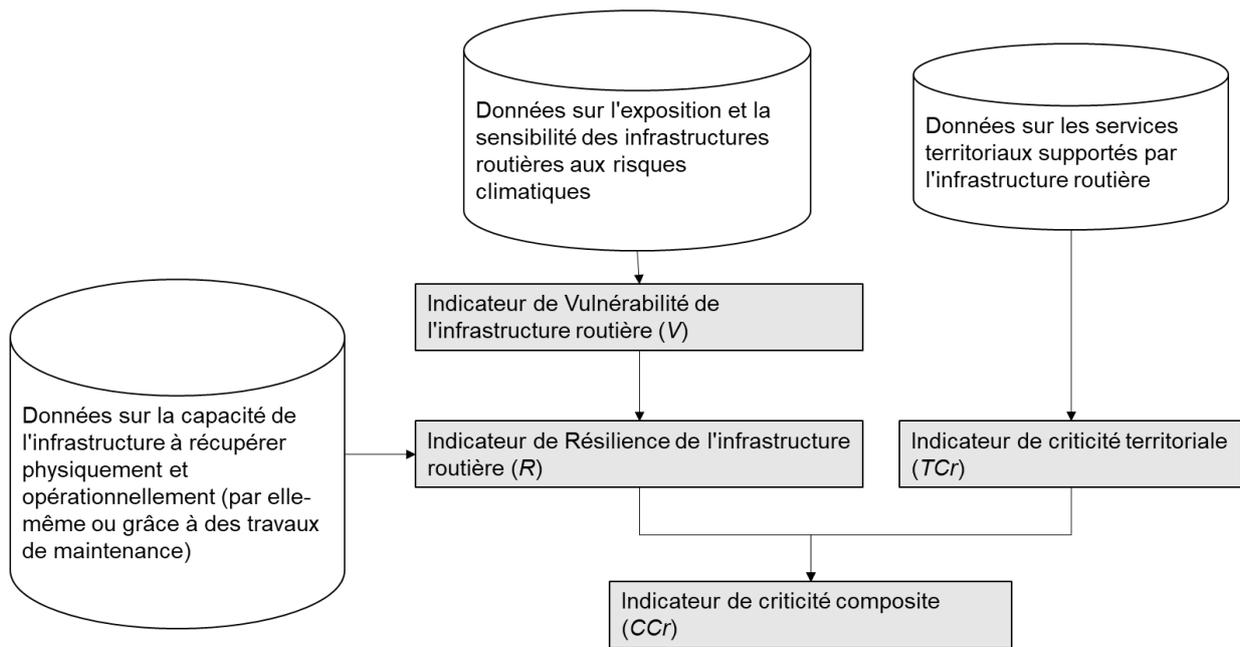


Figure 1 – Cadre méthodologique proposé pour identifier les segments les plus critiques d'un réseau routier en vue d'investissements dans la résilience climatique

3. ETUDES DE CAS

3.1. Le réseau autoroutier Cofiroute (France)

Cette étude de cas porte sur la partie du réseau autoroutier français gérée par la société Cofiroute (VINCI Autoroutes). Ce réseau comprend 1 212 km de route dans le centre-ouest de la France (A10, A11, A19, A28, A71, A81, A85, A86 Duplex). Ce réseau est représenté sur la Figure 2.

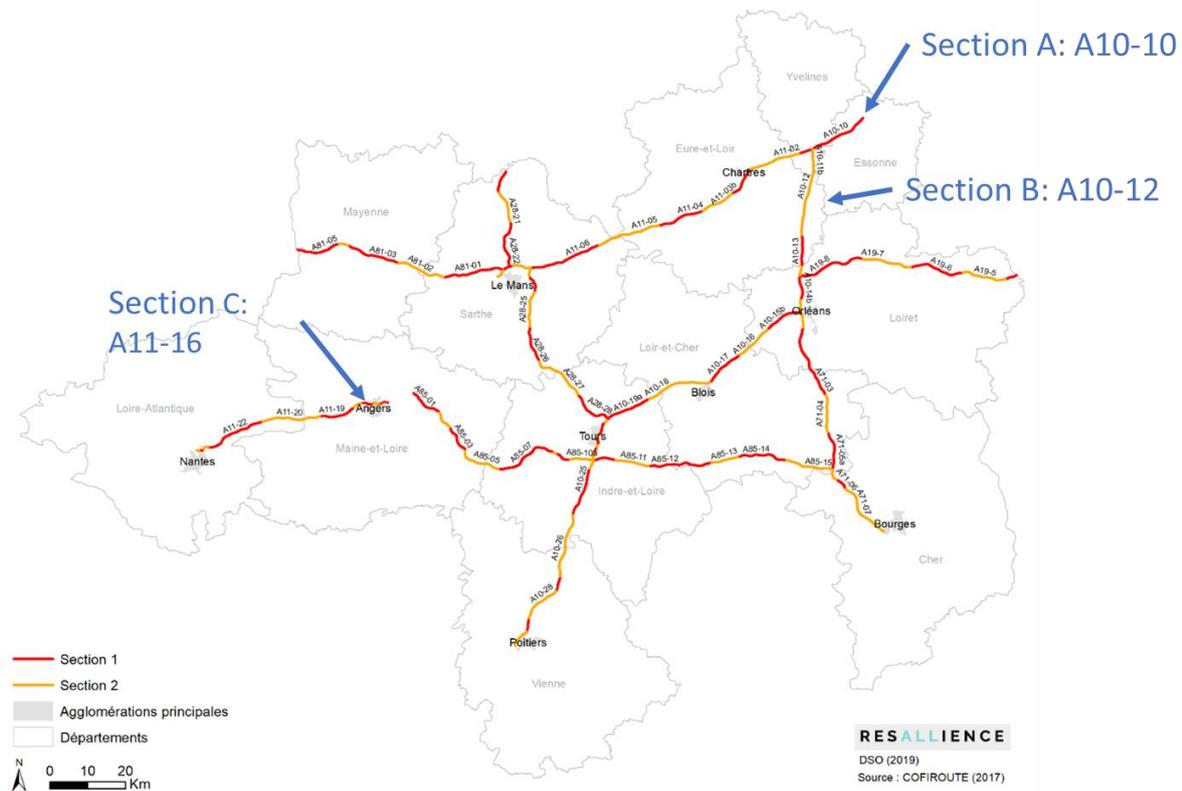


Figure 2 - Carte de situation du réseau routier de Cofiroute (© RESALLIENCE, 2021)

Le cadre proposé a été utilisé pour sélectionner un ensemble de sections d'autoroute qui devraient être analysées en détail en vue de futurs investissements dans la résilience climatique. Le réseau autoroutier de Cofiroute a été divisé en sections en utilisant les entrées/sorties des autoroutes, conformément aux politiques des gestionnaires d'autoroutes. Par souci de concision, le présent article se concentre sur trois segments d'autoroute (A, B et C), illustrés à la Figure 2. Ces trois tronçons ont été choisis arbitrairement pour montrer comment la prise en compte des différents éléments de criticité (vulnérabilité des infrastructures, résilience des infrastructures et criticité des services territoriaux fournis) peut aider à distinguer les tronçons. Dans cette étude de cas, la résilience (la capacité de l'infrastructure routière à retrouver sa fonctionnalité rapidement) n'a pas été pris en compte en raison de l'indisponibilité des données nécessaires.

Vulnérabilité de l'infrastructure routière

La vulnérabilité du réseau routier a été évaluée à l'aide des cartes d'inondation du cadre réglementaire de l'État français [11,12] résumées dans la Figure 3, qui quantifie l'exposition et l'intensité de l'aléa selon une échelle comprise entre 1 (faible intensité) et 7 (forte intensité). Cependant, ce dernier ne prend pas en compte l'ensemble des cours d'eau pouvant affecter l'infrastructure routière. La figure 4 montre le réseau hydrographique de la zone d'étude, qui présente un certain nombre de cours d'eau mineurs et majeurs qui bordent ou croisent les autoroutes. Ces cours d'eau constituent des menaces potentielles pour le fonctionnement du réseau routier, en particulier lorsque la différence d'altitude entre le terrain naturel et l'infrastructure est faible et compte tenu du fait que le changement climatique pourrait entraîner une augmentation de la fréquence des événements de précipitations extrêmes. Ces cours d'eau ont donc également été pris en compte.

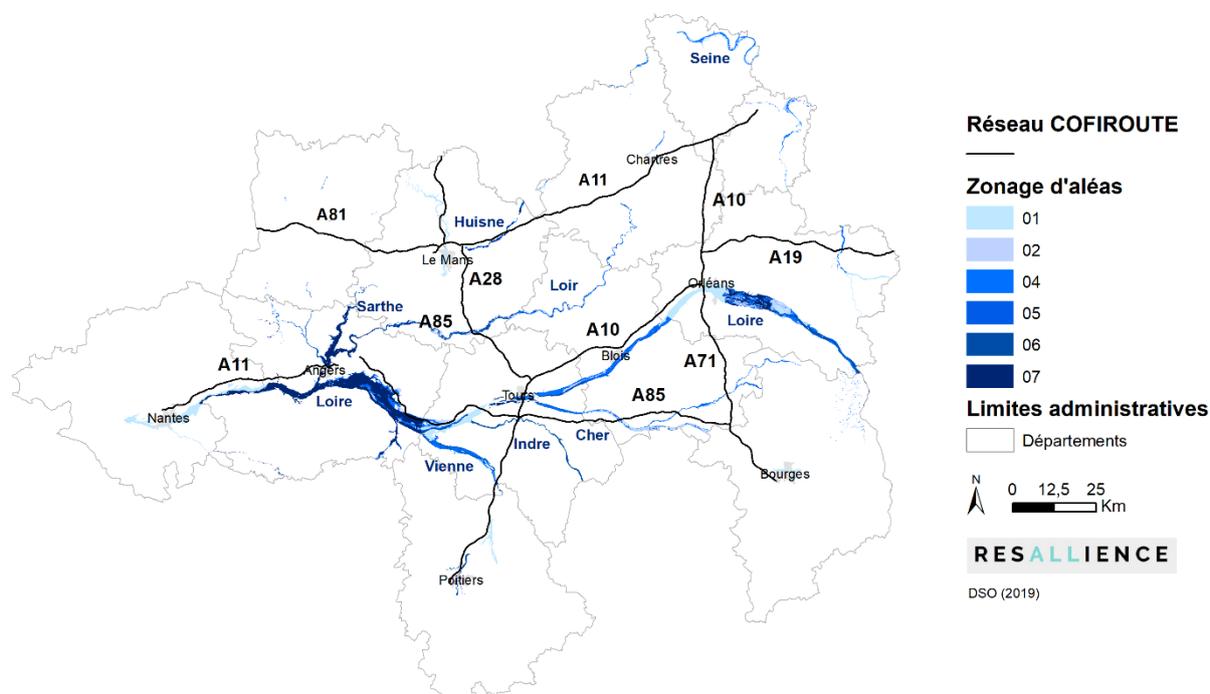


Figure 3 - Zones de risque d'inondation à proximité du réseau autoroutier de COFIROUTE, selon une échelle comprise entre 1 (faible intensité) et 7 (forte intensité). (© RESALLIENCE, 2019)

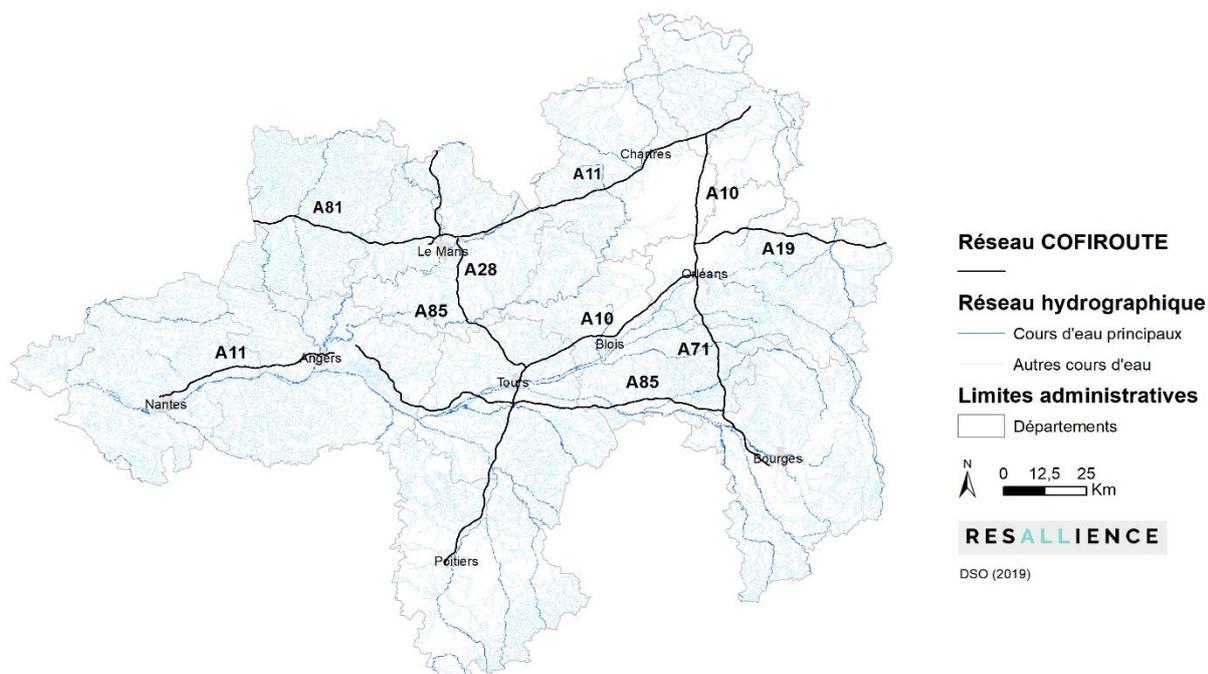


Figure 4 – Réseau hydrographique autour du réseau autoroutier COFIROUTE (© RESALLIENCE, 2019)

Pour quantifier la vulnérabilité de l'infrastructure routière, l'exposition et la sensibilité de l'infrastructure aux inondations ont été considérées et combinées. L'exposition a été évaluée en utilisant l'échelle suivante :

- Valeur 0 : aucun cours d'eau ne borde ou n'intersecte un tronçon d'autoroute
- Valeur 1 : présence d'au moins un cours d'eau qui borde ou intersecte un tronçon d'autoroute.
- Valeur 2 : présence d'un cours d'eau soumis à un dispositif réglementaire et dont l'intensité de l'aléa est faible (valeurs d'aléa réglementaire comprises entre 1 et 3).
- Valeur 3 : présence d'un cours d'eau soumis à un régime de régulation et dont l'intensité de l'aléa est moyenne (valeurs de l'aléa réglementaire comprises entre 4 et 5)
- Valeur 4 : présence d'un cours d'eau soumis à un dispositif réglementaire et dont l'intensité de l'aléa est forte (valeurs d'aléa réglementaire comprises entre 6 et 7).

L'infrastructure routière peut être soumise à des inondations par débordement ou par ruissellement en fonction du différentiel d'altitude avec le terrain naturel environnant (c'est-à-dire la sensibilité). Le seuil de 2m a été retenu pour déterminer si une infrastructure est sensible aux inondations. Cette valeur est considérée, en France, comme la limite supérieure de la hauteur d'eau atteinte lors d'une crue centennale dans le cas d'un scénario d'aléa fort. Elle est également utilisée comme valeur seuil pour l'application de la loi sur l'eau. En utilisant les données sur l'élévation de l'infrastructure et du terrain de l'IGN [13], la sensibilité des sections d'autoroute aux inondations a été évaluée.

Enfin, la vulnérabilité des segments de route aux inondations a été calculée en multipliant les scores d'exposition et de sensibilité. Le Tableau 1 montre les scores d'exposition, de sensibilité et de vulnérabilité associés aux trois sections de route considérés.

Tableau 1 – Exposition, sensibilité et vulnérabilité de trois segments de route du réseau autoroutier de Cofiroute

Identifiant de la section	Nom de la section	Indicateur d'exposition de la section (de 0 à 5)	Indicateur de Sensibilité de la section (0 ou 1)	Indicateur de Vulnérabilité de la section (de 0 à 4)
A	A10-10	1	0	0
B	A10-12	0	1	0
C	A11-16	4	1	4

Indicateurs de criticité territoriale et composite

La présente étude de cas se concentre sur un réseau autoroutier, qui fournit généralement une connexion rapide entre des villes et des zones rurales. Par conséquent, l'indicateur de criticité territoriale utilisé dans cette étude de cas prend en compte les principaux enjeux territoriaux liés aux autoroutes. L'indicateur adopté prend en compte plusieurs critères :

- Densité de la population à proximité d'une section autoroutière (I_{pop})
- Nombre d'Établissements Recevant du Public (ERP) à proximité d'une section autoroutière (I_{ERP})
- Nombre de bâtiments d'activité économique à proximité d'une section autoroutière section (I_{Eco})
- Nombre d'Infrastructures Critiques (IC) à proximité d'une section autoroutière (I_{IC})
- Trafic moyen journalier annuel sur chaque section autoroutière (I_{Trafic})

Ces indicateurs ont été combinés en un seul indicateur de criticité territoriale (TCr) comme suit :

$$TCr = I_{pop} + I_{ERP} + I_{ECO} + I_{IC} + I_{Trafic} \quad (1)$$

Le seuil de 4 km autour de la section d'autoroute a été utilisé pour évaluer le nombre d'habitants, d'établissements ouverts au public, de bâtiments d'activité économique et d'infrastructures critiques à proximité d'une section donnée. Chaque sous-indicateur a reçu une note allant de 1 à 5, comme le montre le Tableau 2. Ce dernier reprend l'approche de Garbolino [14]. L'indicateur de criticité territoriale est donc un score compris entre 5 et 25.

Tableau 2 – Critères utilisés pour le calcul de l'indicateur de criticité territoriale dans l'étude de cas Cofiroute

Indicateur	Score				
	1 pt	2 pts	3 pts	4 pts	5 pts
Pop (Habitants)	Pop<16374	16 375< Pop <33590	33591<Pop<66137	66138<Pop<119905	Pop >119906
ERP (Nombre)	ERP<50	51<ERP < 104	105<ERP<176	177<ERP<296	ERP>297
Eco (Nombre)	Eco<580	581<Eco<1066	1067<Eco<1512	1513<Eco<2211	Eco>2212
IC (Nombre)	IC<36	37<IC<56	57<IC<77	78<IC<127	IC>128
Traffic (Véhicules)	Traffc<16500	16501<Trafic< 29100	29101<Trafic <39000	39001<Trafic< 55000	Trafic>55 001

Enfin, l'indice composite de criticité a été obtenu en multipliant les indicateurs de vulnérabilité des infrastructures et de criticité territoriale associés à chaque section, comme le montre le Tableau 3. Les résultats montrent que la section C est très critique ($CCr=80/100$) tandis que les deux autres sections ne sont pas critiques ($CCr=0$) car elles

ne sont pas vulnérables aux inondations. Cependant, la section A serait légèrement plus critique que la section B sur selon le score de criticité territoriale (Tableau 3).

Tableau 3 – Indicateurs de vulnérabilité des infrastructures, de criticité territoriale et de criticité composite associés à trois segments routiers du réseau Cofiroute.

ID	Nom de la section	Indicateur de Vulnérabilité de l'infrastructure (de 0 à 4)	Indicateur de Criticité territoriale (de 5 à 25)	Indicateur de Criticité composite (de 0 à 100)
A	A10-10	0	20	0
B	A10-12	0	14	0
C	A11-16	4	20	80

3.2. Le futur réseau de transport rapide par bus de Ouagadougou (Burkina Faso)

Cette étude de cas se concentre sur l'infrastructure routière soutenant le projet de réseau de bus à haut niveau de service (BHNS) de Ouagadougou au Burkina Faso. Ce réseau de bus comprend neuf lignes de bus à haute capacité qui agiront comme le réseau primaire d'un système de transport multimodal. La figure 5 montre le plan du système de BHNS prévu.

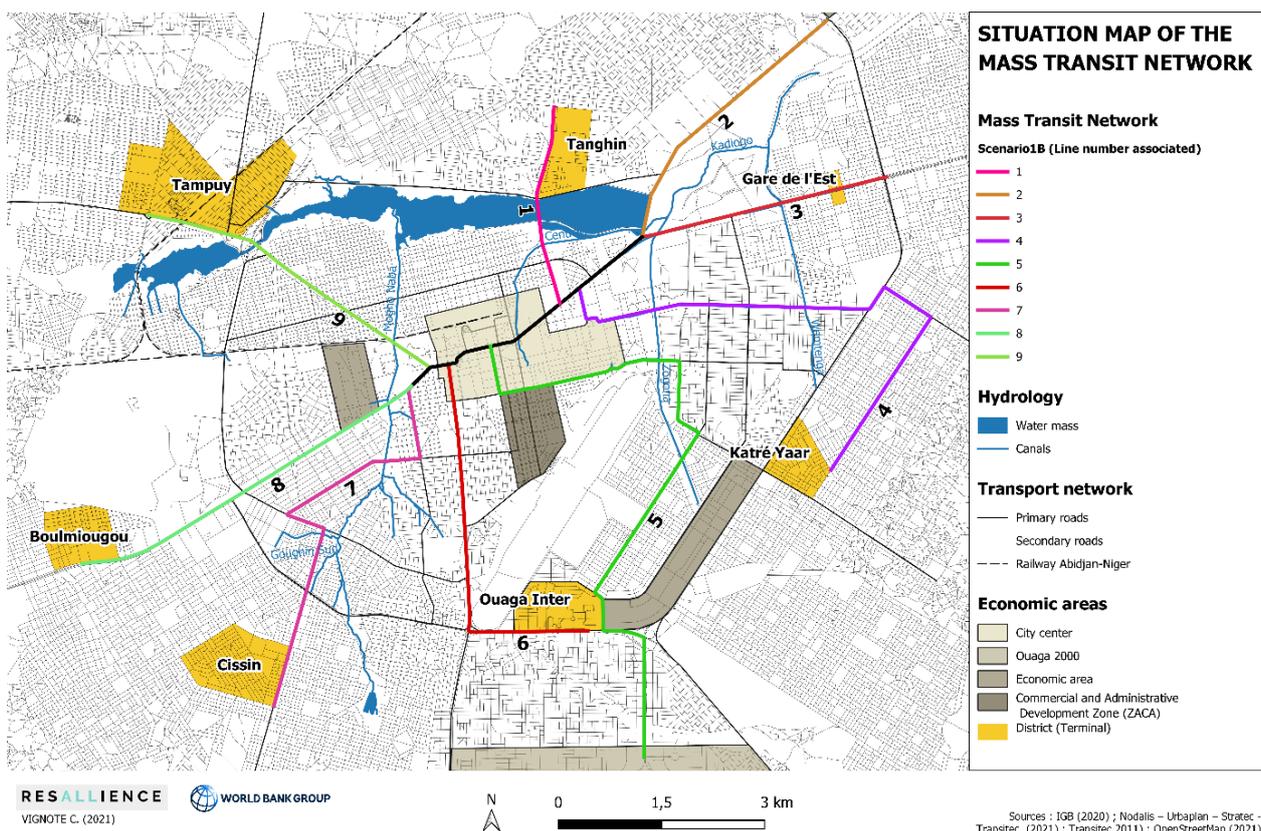


Figure 5 – Carte de situation du réseau de transport en commun planifié de Ouagadougou, Burkina Faso (© RESALLIENCE, 2021)

Le cadre proposé a été appliqué pour identifier les sections de route critiques sur le tracé du système de BHNS qui devraient être prioritaires pour les investissements de résilience et d'adaptation aux inondations. Par souci de concision, le présent article se concentre sur l'application de la méthodologie à la ligne 7 au lieu d'analyser l'ensemble du réseau de bus. Trois sections inondables le long de l'itinéraire de la ligne 7 sont analysées pour montrer comment la prise en compte des différents éléments de criticité (vulnérabilité de l'infrastructure routière, résilience et criticité des services territoriaux fournis) peut aider à

discriminer entre les sections. Ces sections sont présentées dans la figure ci-dessous. La zone A correspond au rond-point de la Bataille du Rail, où se séparent les itinéraires des lignes 7 et 8 (Figure 5). La zone B se situe le long de l'avenue Oumarou Kanazoe, où passe la ligne 7 (Figure 5). La zone C correspond au rond-point Nation Unies et à l'avenue Nelson Mandela au centre-ville, où passent la plupart des lignes de BRT (ligne noire sur la Figure 5).

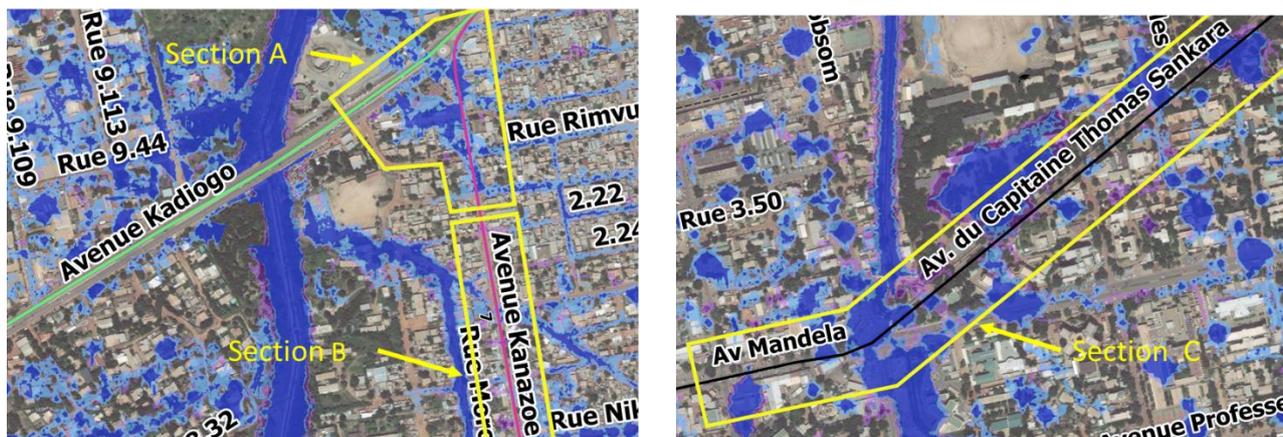


Figure 6 – Cartes des trois zones inondables analysées. Les zones bleu clair et bleu foncé sont inondées par la pluie de période de retour de 2 ans avec une hauteur d'eau inférieure à 15 cm et supérieure à 15 cm, respectivement. (© RESALLIENNE, 2021).

Vulnérabilité de l'infrastructure routière

La vulnérabilité du réseau routier aux inondations a été directement évaluée en utilisant les résultats d'un modèle hydraulique de la ville développé par SEPIA Conseils [15]. Le modèle a considéré un événement pluvial de période de retour 2 ans et un niveau d'eau moyen dans les barrages en aval.

Le modèle hydraulique a fourni des débits de pointe et des hauteurs qui ont été utilisés pour évaluer la vulnérabilité des segments de route aux inondations en utilisant une échelle continue basée sur les impacts sur le trafic sur les segments de route. Les segments de route affectés ont été classés en trois catégories : sans impact, inondé avec trafic ralenti (hauteur d'eau inférieure à 15 cm) et inondé avec trafic bloqué (hauteur d'eau supérieure à 15 cm). Cette classification est basée sur le jugement d'experts et sur l'étude de Pregolato et al. [16], qui établit un lien entre les hauteurs d'eau et les réductions de vitesse. Dans les trois zones considérées, la hauteur d'eau était supérieure à 15 cm. Par conséquent, les trois zones ont été classées comme inondées avec trafic bloqué (hauteur d'eau supérieure à 15 cm). Cette classification peut être traduite en valeurs de vulnérabilité des infrastructures comme suit :

- Valeur 0 : section non impactée
- Valeur 1 : section inondée avec trafic ralenti (hauteur d'eau inférieure à 15 cm)
- Valeur 2 : section inondée avec trafic bloqué (hauteur d'eau supérieure à 15 cm).

Résilience de l'infrastructure routière

La résilience de l'infrastructure routière a été évaluée en fonction de la cause, de la hauteur et de la durée de l'inondation. La cause et la durée de l'inondation ont été évaluées en utilisant les cartes d'inondation et les hydrogrammes —c'est-à-dire les graphiques montrant l'évolution de la hauteur d'eau dans le temps à point spécifique—du modèle hydraulique ainsi que les modèles numériques de terrain et de surface utilisés pour construire le modèle hydraulique [15]. Les cartes d'inondation et les modèles numériques de terrain et de surface ont permis d'identifier la cause probable de l'inondation (débordement d'un canal proche à

la zone considérée, points bas, etc.). Les hydrogrammes ont permis d'évaluer si le système de drainage était capable d'absorber rapidement l'excès d'eau.

Par exemple, la zone C est située sur le rond-point des Nations Unies, qui est traversé par la plupart des lignes de bus. Une section du canal central de 130 m de long est enterrée à quelques mètres à l'est du rond-point. Toute la zone subit des inondations causées par les pluies de période de retour de 2 ans. L'hydrogramme (Figure 7) confirme que les inondations dans cette zone sont causées par un débordement du canal puisque les crues (courbe orange de la Figure 7) apparaissent presque une heure après le pic d'intensité des précipitations (barres bleues de la Figure 7). Cette durée est de l'ordre de grandeur du temps de concentration du bassin versant. L'hydrogramme montre une montée brutale du niveau d'eau, correspondant au moment où le canal déborde sur les zones voisines, puis une lente décroissance (plus de quatre heures pour revenir aux conditions normales).

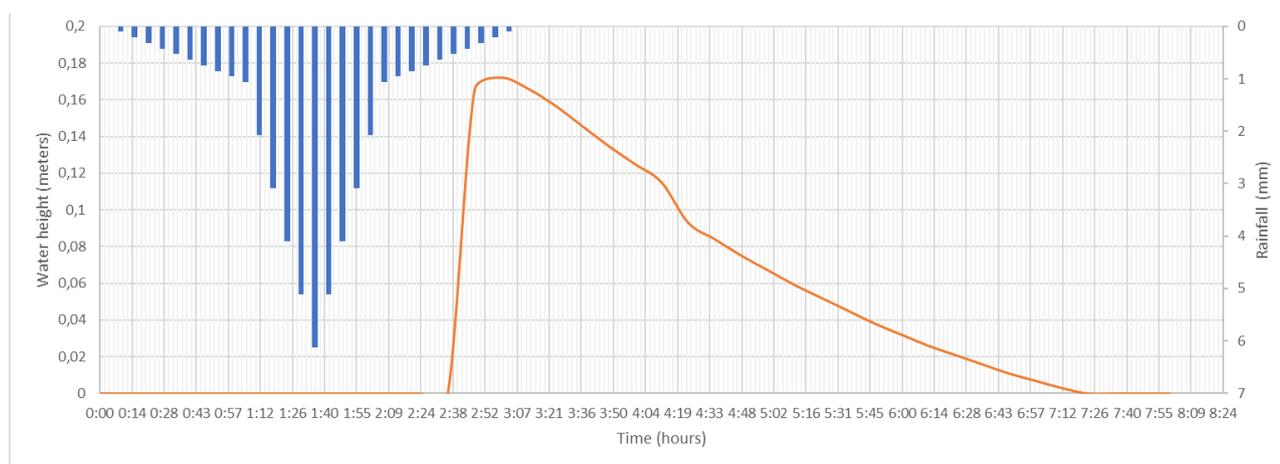


Figure 7 – Hydrogramme (hauteur d'eau) dans la zone C sous la pluie de période de retour de 2 ans, barres bleues = précipitations (mm), courbe orange = hauteur d'eau (m) (©SEPIA Conseils, 2021)

Les sections de route inondées du système de BHNS ont reçu un score de résilience aux inondations (de 1 à 4) en fonction de la hauteur et de la durée de l'inondation selon le jugement des experts. Les sections inondées pendant la plus longue période avec la plus grande hauteur d'eau ont reçu le score maximum (4) tandis que les sections inondées avec la plus faible hauteur d'eau et une durée limitée par rapport aux autres sections ont reçu un score de 1.

- Valeur 0 : section non impactée
- Valeur 1 : section inondée avec un trafic ralenti et une récupération rapide
- Valeur 2 : section inondée avec un trafic ralenti et une récupération lente
- Valeur 3 : section inondée avec un trafic bloqué et une récupération rapide
- Valeur 4 : section inondée avec un trafic bloqué et une récupération lente

Le tableau 4 propose un résumé de l'évaluation de la vulnérabilité et de la résilience aux inondations des trois zones.

Tableau 4 – Valeurs des indicateurs de vulnérabilité et de résilience des infrastructures associés à trois sections inondables du système de BHNS prévu à Ouagadougou.

ID	Ligne(s) de bus affectée(s)	Route/intersection affectée(s) (Ave = Avenue)	Description de l'inondation	Indicateur de Vulnérabilité de l'infrastructure (de 0 à 2)	Indicateur de Résilience de l'infrastructure (de 0 à 4)
A	Ligne 7 & Ligne 8	Ave Oumarou Kanazoe & Ave Kadiogo	Inondation due au ruissellement de surface provenant des rues à l'est. Il n'y a pas de chemin clair pour l'eau arrivant à l'Ave Kanazoe vers le canal Mogho Naaba, ce qui augmente les inondations sur l'avenue, et donc sur le rond-point (place de la bataille du rail). La hauteur d'eau atteint 30cm.	2	3
B	Ligne 7	Ave Oumarou Kanazoe & Ave Ouezzin Coulibaly		2	3
C	Section utilisée par la plupart des lignes	Ave Nelson Mandela & rondpoint des Nation Unies	L'inondation du rond-point est causée par un débordement du canal, la capacité de ce dernier étant insuffisante. La hauteur de l'inondation est supérieure à 40 cm et met plusieurs heures à diminuer.	2	4

Criticité territoriale

Comme la présente étude de cas se concentre sur le projet de système de transport rapide par bus de Ouagadougou, l'évaluation de la criticité territoriale a été axée sur les enjeux urbains liés à ce système de BHNS. Deux critères ont été pris en compte et combinés pour évaluer la criticité des services supportés par les routes : le trafic projeté des lignes de BHNS (nombre moyen annuel de passagers) et les enjeux urbains liés au service des lignes de BHNS. Les données de trafic des lignes de BHNS ont été extraites de l'étude OPTIS [17]. Les problèmes urbains ont été évalués en utilisant les données d'occupation des sols obtenues à partir d'OpenStreetMap [18] et les connaissances des experts locaux. Chaque sous-indicateur a reçu une note allant de 1 à 5, comme le montre le Tableau 5.

Tableau 5 – Critères utilisés pour le calcul de l'indicateur de criticité territoriale dans l'étude de cas de Ouagadougou

Indicateur	Score				
	1 pt	2 pts	3 pts	4 pts	5 pts
Trafic (usagers)	Trafic < 16500	16501 < Trafic < 29100	29101 < Trafic < 39000	39001 < Trafic < 55000	Trafic > 55 001
Enjeux urbains	Zones résidentielles ne présentant pas de problèmes d'accessibilité particuliers	Zones résidentielles et commerciales mixtes	Zones résidentielles et commerciales mixtes, y compris quelques installations critiques (universités, hôpitaux, etc.)	Zones d'activité, y compris les installations critiques (universités, hôpitaux, etc.)	Zones à forte concentration d'activités (par exemple, le centre-ville)

Les valeurs des deux sous-critères ont été additionnées pour obtenir un score de criticité territoriale. Par exemple, le tronçon de l'avenue Oumarou Kanoze sur la ligne 7 (zone B) s'est vu attribuer un score de criticité territoriale de 2 parce que la demande (5 506 893 passagers par an) sur la ligne 7 est relativement faible par rapport aux autres lignes et aussi parce que ce tronçon de la ligne 7 dessert principalement des zones résidentielles où les bus à grande capacité sont moins nécessaires. Par conséquent, l'impact des perturbations du service sur cette section serait limité. Au contraire, les sections du rond-point des Nations

Unies et de l'avenue Nelson Mandela (zone C) partagées par la plupart des lignes de bus ont reçu un score de 9 parce qu'elles desservent le centre-ville et attirent la plus forte demande (16 400 643 passagers par an) du système de BHNS.

Indicateur de criticité composite

Enfin, un indice composite de criticité des infrastructures routières a été calculé en multipliant les scores de résilience aux inondations et de criticité territoriale. Le Tableau 6 présente les valeurs de l'indice de criticité territoriale et de l'indice de criticité composite associées aux trois sections considérées. Ce tableau comprend également une description des enjeux urbains identifiés autour de ces sections. Les résultats montrent que la section C est très critique ($CCr = 36/40$) par rapport aux deux autres sections. La section A est légèrement plus critique ($CCr = 15/40$) que la section B ($CCr = 10/40$).

Tableau 6 – Valeurs de criticité territoriale et composite associées à trois sections de l'étude de cas de Ouagadougou

ID	Ligne(s) de bus affectée(s)	Description des enjeux urbains liés au système de transport	Indicateur de Criticité territoriale (de 2 à 10)	Indicateur de Criticité composite (de 0 à 40)
A	Ligne 7 & ligne 8	Zone commerciale et résidentielle (boutiques et marché en bordure de route, équipements privés, magasins, banques). La ligne 8 dessert la route nationale N1 en direction de Bobo-Dioulasso.	5	15
B	Ligne 7	Dessert les zones résidentielles. La ligne 7 est la ligne la moins importante du système de BHNS en termes de transit et d'accessibilité.	2	10
C	Section utilisée par la plupart des lignes	Centre-ville Quartier administratif. Marché central, écoles, services publics, ambassades, camps militaires.	9	36

4. DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Cet article a développé un cadre méthodologique pour prioriser les segments routiers critiques en vue d'investissements dans la résilience climatique, qui a la particularité d'intégrer la vulnérabilité, la résilience et la criticité territoriale de l'infrastructure routière. Cette méthodologie a été appliquée à deux études de cas : le réseau autoroutier Cofiroute en France et le réseau de transport rapide par bus prévu à Ouagadougou.

La comparaison des deux études de cas a montré que le cadre proposé peut être adapté aux caractéristiques du réseau et aux données disponibles. L'étude de Cofiroute s'est appuyée sur des cartes d'extension des crues et des cours d'eau, qui ne fournissaient pas d'informations sur la récupération de l'infrastructure. Par conséquent, l'indice de résilience n'a pas été inclus dans cette étude de cas. L'étude de cas de Ouagadougou s'est appuyée sur un modèle hydraulique qui a fourni des hydrogrammes montrant l'évolution des niveaux d'eau dans le temps et a donc permis d'évaluer la résilience. La criticité territoriale des tronçons routiers du réseau Cofiroute a été évaluée à l'aide de nombreuses données quantitatives sur le territoire (notamment le trafic journalier annuel, le nombre d'établissements ouverts au public à proximité d'un tronçon autoroutier, et le nombre d'infrastructures critiques à proximité d'un tronçon autoroutier), tandis que l'étude de cas de

Ouagadougou s'est appuyée sur des données plus qualitatives (trafic du projet de BHNS, et évaluation par des experts des enjeux urbains autour des tronçons routiers).

Les résultats montrent que la prise en compte de la vulnérabilité, de la résilience et de la criticité territoriale des tronçons routiers conduit à un indice de criticité composite qui permet de discriminer entre la criticité de plusieurs tronçons. Par exemple, les sections A et B de l'étude de cas de Ouagadougou ont présenté les mêmes scores de vulnérabilité et de résilience mais des scores de criticité territoriale différents, ce qui permet la discrimination entre les deux sections. En revanche, les sections A et C de l'étude de cas de Cofiroute ont présenté les mêmes scores de criticité territoriale mais des scores de vulnérabilité différents, ce qui a permis la discrimination entre ces sections. Par conséquent, l'indice composite de criticité proposé est un outil puissant pour classer par ordre de priorité les sections qui devraient être considérées pour des investissements de résilience. Les sous-indices peuvent ensuite être utilisés pour comprendre la valeur finale de l'indicateur composite de criticité et aider les décideurs à identifier les solutions appropriées.

Bien que le cadre méthodologique proposé puisse prendre en compte plusieurs types de risques climatiques (chutes de neige, vents violents, etc.), les études de cas se sont concentrées sur les inondations. Ce cadre devrait donc être étendu à l'avenir pour prendre en compte de multiples aléas.

REMERCIEMENTS

Une partie des travaux présentés dans cet article a été réalisée dans le cadre de projets d'assistance technique réalisés par RESALLIANCE et financés par VINCI Autoroutes (étude de cas de Cofiroute) et la Banque mondiale (étude de cas de Ouagadougou). Nous saluons également les contributions de Louis Berger international (WSP) et d'AGEIM Ingénieurs Conseils à l'assistance technique liée à l'étude de cas de Ouagadougou.

REFERENCES

1. UK Department for Transport. https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/335115/transport-resilience-review-web.pdf (2014). *Transport Resilience Review - A review of the resilience of the transport network to extreme weather events*.
2. World Bank Group. (2010). *Inondations du 1er Septembre 2009 au Burkina Faso - Evaluation des dommages, pertes et besoins de construction, de reconstruction et de relèvement (French)*.
3. IPCC. <http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CBO9781139177245> (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. doi:10.1017/CBO9781139177245.
4. Shivaprasad Sharma, S. V., Roy, P. S., Chakravarthi, V. & Srinivasa Rao, G. (2018). Flood risk assessment using multi-criteria analysis: A case study from Kopili river basin, Assam, India. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* Vol 9, pp 79–93.
5. Pregnotato, M., Ford, A., Glenis, V., Wilkinson, S. & Dawson, R. (2017). Impact of Climate Change on Disruption to Urban Transport Networks from Pluvial Flooding. *Journal of Infrastructure Systems* Vol 23, pp 04017015.
6. Sohounou, P. Y. R. & Neves, L. A. C. (2021). Assessing the effects of link-repair sequences on road network resilience. *International Journal of Critical Infrastructure Protection* Vol 34, pp 100448.
7. Demirel, H., Kompil, M. & Nemry, F. (2015). A framework to analyze the vulnerability of European road networks due to Sea-Level Rise (SLR) and sea storm surges. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* Vol 81, pp 62–76.
8. Mason, D. (2016). RESILIENCE PLANNING IN ROAD NETWORK.
9. CEREMA. (2019). *Vulnérabilités et risques : les infrastructures de transport face au climat*.
10. Selouane, K., Gonzva, M. & Soto, D. (2019). Adapter les infrastructures de transport pour améliorer la résilience des territoires. *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement* pp 26–29.
11. Etalab. <https://www.data.gouv.fr/fr/>. Plateforme ouverte des données publiques françaises.

12. Ministère de la Transition écologique. <https://www.georisques.gouv.fr/>. Base de données Géorisques.
13. Institut national de l'information géographique et forestière (IGN). <https://www.ign.fr/>. Base de données de l'IGN.
14. Garbolino, E. (2009). Contributions à l'étude du risque de transport sur route de marchandises dangereuses dans un espace transfrontalier.
15. SEPIA Conseils. (2021). *Aerial Surveying, Digital Terrain Model and Flood Hazard Assessment in Ouagadougou - Atlas des zones inondables*.
16. Pregolato, M., Ford, A., Wilkinson, S. M. & Dawson, R. J. (2017). The impact of flooding on road transport: A depth-disruption function. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* Vol **55**, pp 67–81.
17. Nodalis, Urbaplan, Stratec & Transitec. (2021). *Ouagadougou Public Transport Implementation Study (OPTIS)*.
18. OpenStreetMap contributors. www.openstreetmap.org. OpenStreetMap®.