

NOUVEL INDICE DE PRIORITÉ DE FINANCEMENT DES ROUTES (IPFR) POUR LA SÉLECTION DES PROJETS ROUTIERS DE « HAUTE PRIORITÉ » DANS LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT EN UTILISANT L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

NEW ROAD FUNDING PRIORITY INDEX (RFPI) FOR THE SELECTION OF "HIGH PRIORITY" ROAD PROJECTS IN DEVELOPING COUNTRIES USING PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS

Emmanuel KOSSÈ KABA, Gabriel J. ASSAF

kaba.emmanuel@gmail.com

Gabriel.Assaf@etsmtl.ca

Département de génie de la construction, École de technologie supérieure
1100, Notre-Dame Ouest Montréal Québec, Canada H3C 1K3

1. INTRODUCTION

Les routes sont cruciales pour le développement économique et socioéconomique des communautés et contribuent ainsi à leur bien-être et à la réduction de la pauvreté en Afrique

subsaharienne. Elles permettent de connecter les individus aux marchés, aux écoles, aux hôpitaux et aux centres sociaux. De plus, pour l'atteinte des objectifs de développement durable des Nations Unies à l'horizon 2030 dont le thème est « Transformer notre monde », les gouvernements et les institutions financières

internationales doivent investir judicieusement dans les secteurs stratégiques des pays en développement, dont font partie les routes.

La construction des routes constitue en effet un enjeu très important pour le développement économique et socioéconomique car elle permet le désenclavement des régions isolées et facilite les échanges commerciaux nationaux et internationaux, bien que les densités du réseau routier de la majorité des pays en développement (route à faible volume de trafic avec un débit moyen journalier moyen plus petit que 300 véhicules par jour) en kilomètre de routes par habitant et par kilomètre carré soient très faibles comparativement à la moyenne mondiale des régions. Le réseau routier de l'Afrique comporte seulement 204 km de routes sur 1 000 km², avec seulement un quart qui est revêtu, tandis que la moyenne mondiale est de 944 km sur 1 000 km², avec plus de la moitié des routes revêtues (Ken, 2011). Cependant, il est aussi important de maintenir les routes existantes du réseau routier dans un bon état pour ne pas restreindre l'accessibilité et la mobilité au cours de l'année. En outre, si les travaux d'entretien préventif (courant, périodique) ne sont pas réalisés au moment opportun, l'état des routes se dégrade très rapidement, ce qui peut mener à des travaux de réhabilitation majeurs ou de reconstruction qui coûteront environ 4 fois plus cher que les travaux d'entretien (Burningham et Stankevich, 2005).

Le déséquilibre entre le taux de dégradation des infrastructures existantes et les fonds affectés à leur entretien, la tendance à privilégier les nouvelles constructions et la méconnaissance de l'importance d'un entretien de qualité réalisé au moment opportun s'avèrent les défis à relever pour le secteur routier dans les pays en développement (DFID, 2016). De surcroît, le manque de financement des projets routiers tant pour la construction que pour l'entretien constitue un autre défi très important à relever. Le but principal de cette étude est le développement d'un indice de priorité de financement des routes (IPFR) pour sélectionner des projets dits de *hautes priorités* admissibles au financement des administrations routières et des bailleurs des fonds. La spécificité de cette étude est que le développement de l'IPFR a été effectué en utilisant des méthodes d'analyse statistique multivariée et en collectant des données disponibles et accessibles de l'administration routière concernée. L'obtention des intrants pour une analyse sophistiquée comme l'analyse coût-avantage (CA) avec le logiciel HDM-4 nécessite beaucoup de temps et est dispendieux ; de plus, l'analyse CA est monocritère. L'IPFR est donc un tremplin pour la sélection des projets routiers de *hautes priorités* qui feront l'objet d'évaluation fonctionnelle et structurale et d'analyse de la demande en trafic rigoureuse pour l'obtention des données plus détaillées qui permettront des analyses technico-économiques plus sophistiquées avec le logiciel Highway design and Management (HDM-4). Cet outil se veut innovateur puisque très peu d'applications ont été conduites dans le secteur routier.

Ce document présente d'abord une revue de la littérature sur les outils de priorisation des routes, suivie de la méthodologie qui décrit la zone d'étude et les étapes de construction de l'IPFR, des résultats et de la discussion qui présentent principalement les résultats de l'ACP et enfin une conclusion récapitulant les éléments saillants de cet article.

2. REVUE DE LITTÉRATURE

2.1. Outils de priorisation des projets

Cette revue de littérature présente un récapitulatif des outils d'aide à la décision applicables dans le secteur des infrastructures routières. Les outils d'aide à la décision constituent l'ensemble des méthodes, des approches analytiques, des procédures et des structures permettant l'évaluation des projets ou des politiques dans les administrations routières (Healy et al., 2007). Plusieurs outils ont été développés par des chercheurs pour aider les décideurs et les administrations de gestion des routes dans leurs processus de prise de décision concernant les projets de transports. Ces outils peuvent être regroupés en 2 grandes catégories : les outils d'analyse monocritère (analyse de coûts de cycle de vie, analyse coût-avantage) et des outils d'analyse multicritères (analyse hiérarchique des procédés, optimisation mathématique).

2.2. L'analyse de coût de cycle de vie et analyse coût-avantage

L'analyse de coût de cycle de vie (ACCV) des projets est un sous-ensemble de l'analyse coût-avantage utilisant des principes d'analyse économique pour comparer différentes alternatives d'investissements des projets ayant les mêmes avantages pendant la durée de vie utile des projets. Cependant, l'analyse coût-avantage (CA) est la plus fréquemment utilisée pour l'évaluation économique des projets routiers, que ce soit dans les pays en développement ou développés (Bhandari, Shahi et Shrestha, 2016). L'analyse CA est une analyse quantitative qui permet de comparer tous les coûts et les avantages actualisés à l'année de référence afin de déterminer les principaux critères économiques (World Bank Group, 2010). Les coûts considérés dans l'évaluation économique des projets routiers sont composés des coûts d'administration (coûts de construction, d'entretien, de réhabilitation, résiduels, de gestion), des coûts des usagers (coûts de temps de trajet, d'exploitation des véhicules, des accidents), des coûts des externalités (coûts de pollution de l'air, de nuisance sonore et de perturbation du voisinage) (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994a). Les avantages des projets routiers sont subdivisés en avantages quantifiables (en termes monétaires) et non quantifiables (PIARC, 2013). Les avantages quantifiables sont composés des réductions des coûts usagers et d'entretien et du développement économique régional. Les avantages non quantifiables sont principalement issus de l'augmentation des revenus et de la qualité de vie de la population locale, par exemple la santé, l'éducation, l'interaction sociale et la participation à la vie politique. Bien que ces avantages non quantifiables soient importants, ils sont très rarement considérés dans l'analyse économique, car l'analyse CA ne permet que l'évaluation des avantages en termes monétaires. Les principaux critères économiques sont la valeur actuelle nette (VAN), le taux de rendement interne (TRI) et le rapport avantage-coût (A/C) et permettent la vérification de la rentabilité économique des projets.

Bien que l'analyse CA soit un outil robuste d'évaluation de la rentabilité économique des projets routiers, la fiabilité de ces

résultats est tributaire des types et des sources des données (Kaan *et al.*, 2004). En effet, les intrants de l'analyse CA nécessitent des informations très détaillées et assez précises des chaussées. Cependant la collecte de ces informations peut s'avérer très dispendieuse tant en coût qu'en temps pour les pays en développement dont les fonds sont déjà très limités pour une multitude de projets routiers à financer. D'autres considérations peuvent aussi rendre l'analyse CA moins attrayante comme l'exigence que tous les coûts et les avantages soient monétisables et l'évaluation des projets routiers sur la base d'un seul critère qui est le critère économique. D'après (Beria, Maltese et Mariotti, 2012), l'analyse CA est une approche rigoureuse formelle, procurant un cadre rationnel pour l'évaluation des projets et des résultats clairs qui peuvent être facilement communiqués et partagés. Toutefois, ces procédures techniques d'application sont très complexes. Aussi le processus utilisé pour monétiser certaines externalités environnementales intangibles est-il questionnable. Par conséquent, l'analyse multicritère peut s'avérer une bonne alternative pour la sélection de projets en utilisant les données disponibles et accessibles répondant aux objectifs et aux politiques adoptés par les administrations routières des pays en développement ou les bailleurs de fonds.

2.3. L'analyse multicritère

Les approches d'analyse multicritère (AMC) sont de plus en plus utilisées dans l'évaluation et la priorisation des Infrastructures pour répondre aux exigences de concilier les objectifs politiques et le manque de données (Marcelo *et al.*, 2016). Le processus de prise de décision de financement des infrastructures est un problème complexe nécessitant la participation de plusieurs parties prenantes ayant des objectifs très souvent divergents. Dans ce cadre, une AMC qui permet de faire le compromis entre les différents objectifs sous forme de critères est appropriée. Ainsi, l'AMC est définie par (Beria, Maltese et Mariotti, 2012) comme étant un outil de sélection d'alternatives de projets ayant des impacts sociaux, économiques et environnementaux pertinents en considérant une multitude de critères et d'opinions des parties prenantes. L'AMC commence par l'énumération des objectifs, suivie de l'identification des indicateurs correspondant à ces objectifs, et la mesure des indicateurs. Les mesures des indicateurs ne s'effectuent pas seulement en termes monétaires, mais aussi en termes non monétaires (appréciations qualitatives). Les indicateurs qualitatifs s'appuient sur des méthodes d'attribution des points (échelle de Likert), de classement et de pondération pour inclure les aspects intangibles comme les aspects sociaux et certains aspects environnementaux (Beria, Maltese et Mariotti, 2012). La détermination des poids des indicateurs est l'étape fondamentale de l'AMC. Donc, les méthodes d'AMC se différencient principalement au niveau de leurs procédures de détermination des poids. Il existe principalement cinq (5) méthodes multicritères appropriées pour l'évaluation des projets de transports : analyse hiérarchie des procédés (AHP), analyse en réseau des procédés (ANP), REGIME, ELECTRE family, approche Multi-attribute utility, type ADAM (Tsamboulas, Yiotis et Panou, 1999). Une attention particulière est accordée à l'AHP dans ce document, puisqu'elle est la plus connue et la plus utilisée pour l'évaluation des infrastructures routières.

L'AHP est une technique mathématique d'aide à la prise de décision développée par (Saaty, 1980) et la plus fréquemment utilisée pour faciliter le processus de sélection des meilleures alternatives par les décideurs. En effet, l'AHP permet de décomposer un processus de prise de décision complexe en structure hiérarchique qui comporte au minimum trois niveaux. Le premier niveau est l'objectif ultime de l'analyse, suivi des critères principaux au deuxième niveau et des sous-critères au troisième niveau (Tsamboulas, Yiotis et Panou, 1999). La principale caractéristique de L'AHP est qu'en plus des données quantitatives (monétisables), les données qualitatives peuvent aussi être incluses. Les étapes de l'AHP sont les suivantes : la structuration d'une hiérarchie, la priorisation par comparaison par paires, l'établissement du vecteur de priorité et la vérification de la cohérence de préférence des jugements (Farhan et Fwa, 2009). La structuration de la hiérarchie consiste à dresser un organigramme en spécifiant l'objectif ultime au premier niveau et les critères et les sous-critères aux niveaux suivants. Les critères peuvent être davantage décomposés en sous-critères dépendamment de la complexité du problème étudié (Javed, 2011). La comparaison par paires des critères et des sous-critères est effectuée à l'aide d'une échelle de 9 points recommandée par (Saaty, 1980). Ainsi, la préférence de jugement est faite en attribuant une valeur de 1 aux éléments de même importance, 3 à l'élément un peu plus important que l'autre, 5 à l'élément plus important que l'autre, 7 à l'élément beaucoup plus important que l'autre et 9 à l'élément beaucoup plus important que l'autre. Les valeurs intermédiaires 2, 4, 6, 8 peuvent aussi être attribuées aux préférences de jugement en fonction de l'importance d'un élément par rapport à un autre. Le vecteur priorité est la synthèse des priorités de comparaison par paires des critères ou des sous-critères. La synthèse des priorités est effectuée à partir du deuxième niveau en multipliant les priorités locales par la priorité correspondant à leur critère du niveau supérieur, et en les additionnant pour chaque élément du niveau correspondant aux critères que chaque élément affecte (Tsamboulas, Yiotis et Panou, 1999). La dernière étape de l'AHP est la vérification de cohérence de la préférence des jugements. Pour ce faire, (Saaty, 1980) a établi une limite de 10% d'incohérence permise par les jugements humains qui est le coefficient de consistance (CR). CR est le rapport entre l'indice de cohérence (IC) et l'indice de cohérence aléatoire (RI). IC dépend de la valeur propre maximale de la matrice de priorité et RI dépend du nombre de critères ou sous-critères.

Les méthodes de prise de décision à l'aide de l'AMC peuvent être subdivisées en deux grandes catégories : la catégorie comprenant les méthodes avec une série d'alternatives connues explicitement (un nombre fini d'alternatives) et la catégorie avec des méthodes comportant une série d'alternatives connues implicitement (Cafiso *et al.*, 2002). Les méthodes de la première catégorie incluent l'AHP qui est déjà décrit ci-dessus. Au niveau des méthodes de la deuxième catégorie, les alternatives sont représentées sous forme de vecteurs de variables de décision et les critères sont les fonctions objectives de ces variables. L'ensemble des solutions admissibles de ces variables sont les contraintes exprimées sous forme d'équations et d'inéquations (Cafiso *et al.*, 2002). Dans la littérature, les méthodes de cette deuxième catégorie sont nommées méthodes d'optimisation multicritères (MO). L'optimisation mathématique des projets routiers est un outil très complexe. Cependant, elle permet

d'allouer efficacement les ressources afin que les avantages des projets routiers soient maximisés ou les coûts totaux minimisés (fonction objective) en considérant la limite budgétaire (contraintes) (AASHTO, 2012). Les modèles mathématiques tels que les programmations linéaire, non linéaire et dynamique sont utilisés pour optimiser les projets d'entretien, de construction et de réhabilitation de routes. Toutefois, la programmation linéaire est la plus recommandée par les chercheurs, car elle s'avère simple à utiliser, s'adapte à différentes situations et s'applique au niveau réseau pour trouver la solution optimale (Javed, 2011). La programmation linéaire ne permet pas cependant d'analyser un nombre élevé de variables de décision et comporte des problèmes liés aux combinaisons linéaires. Ces inconvénients peuvent être résolus par l'utilisation de l'algorithme génétique (AG). L'AMC permet d'analyser l'importance des indicateurs en fonction de poids. Cependant, les poids des différents indicateurs pourraient être agrégés linéairement avec les valeurs normalisées des indicateurs pour une évaluation globale de chaque projet routier. L'agrégation des indicateurs est nommée indicateurs ou indices composites (IC).

2.4. Indices composites

L'indice composite (IC) est un outil permettant de mesurer un phénomène complexe en considérant simultanément plusieurs dimensions. L'IC composite est issu de l'agrégation de plusieurs indicateurs ou sous-indicateurs afin de mettre en évidence des dimensions complexes et souvent imperceptibles telles que l'environnement, l'économie, le social ou le développement technologique. Cependant, les scientifiques ne sont pas unanimes quant à l'utilisation de l'IC. Donc naturellement, il y a des débats entre ceux qui sont pour et ceux qui sont contre cet indice (OECD, 2008). En ce qui concerne ceux qui soutiennent le développement de l'IC, ils soutiennent que l'IC permet de synthétiser des problèmes complexes pour appuyer les décideurs en leur donnant une vision plus large qui facilitera davantage l'interprétation qu'en cherchant à développer des tendances sur plusieurs indicateurs distincts. Ils défendent aussi l'idée que l'IC est plus attrayante pour l'intérêt public, puisqu'il peut être utilisé pour comparer les performances des projets et pour réaliser les suivis et évaluations dans le temps de ces projets. Ils estiment également que l'IC peut contribuer à la réduction de la taille d'un grand nombre d'indicateurs ou à l'incorporation de l'information dans une taille limitée d'indicateurs existants. Cependant, ceux qui sont contre l'application de l'IC estiment qu'il peut mener à l'adoption de politiques fallacieuses et non robustes dans le cas où il aurait été mal construit ou mal interprété; ce qui peut conduire les décideurs à prendre des décisions simplistes. De plus, les opposants à l'application de l'IC affirment aussi que chaque étape de construction de l'IC nécessite des choix et jugements qui peuvent être subjectifs et conduisent à des résultats erronés, c'est-à-dire que les étapes de sélection et de pondération sont souvent influencées par des défis ou des objectifs politiques divergents des parties prenantes. L'exigence d'une grande quantité de données pour la construction de l'IC est aussi un argument avancé par ceux qui sont contre l'utilisation de cet indice. Bien que les arguments des chercheurs sceptiques quant à l'utilisation de l'IC soient justifiables, des solutions ont été développées pour combler ces manques dans les

étapes de construction de l'IC. En effet, l'analyse de sensibilité permet de vérifier la robustesse des IC. En outre, un sous-indice composite peut être développé pour chaque dimension afin d'éviter les prises de décisions simplistes. Le développement des sous-indices et l'analyse de typologie des projets routiers feront l'objet d'un prochain article. Les jugements d'opinions qu'implique chaque étape de construction de l'IC doivent être transparents et basés sur des principes statistiques solides (Mainali et Silveira, 2015; OECD, 2008; Saisana et Tarantola, 2002).

Il existe plusieurs exemples d'indices composites qui ont été développés à travers le monde. L'indice de développement humain (IDH) a été introduit en 1999 pour mesurer le développement humain de 177 pays en se basant sur les composantes comme l'expérience de vie, le taux d'alphabétisation des adultes et le taux brut d'inscription. Les indicateurs de ces trois composantes ont été aussi utilisés pour la construction des sous-indices tels que le produit intérieur brut (PIB), l'indice d'éducation (IE) et l'indice d'expérience de vie (IEV). L'indice de durabilité environnemental (IDE) a été développé en 2000 pour évaluer l'aptitude de protection de l'environnement de 146 pays au cours des prochaines décennies. L'IDE a été construit en établissant des composantes comme les systèmes environnementaux, la réduction du stress, la réduction de la vulnérabilité humaine, la capacité sociale et institutionnelle et la gérance totale. Au total, les cinq composantes de l'IDE étaient composées de 21 indicateurs. L'indice de vulnérabilité économique (IVE) a été créé en 1992 pour mesurer l'ampleur à laquelle l'économie d'un pays est exposée aux aléas sur lesquels il n'a pas le contrôle. L'IVE a permis de comparer 117 pays en considérant des composantes comme les perspectives commerciales, la concentration de l'exportation, la dépendance de la stratégie d'importation et périphéricité (Bandura, 2008). Bien que ces indicateurs composites aient reçu beaucoup de critiques, ils sont maintenant utilisés à travers le monde pour comparer et évaluer les performances des pays. En ce qui concerne le secteur de transport, à notre connaissance il existe un seul indice composite qui est l'indice de sécurité routière (ISR) développé pour comparer la sécurité routière entre les pays. L'ISR a été développé en se basant sur des indicateurs issus des résultats finaux de sécurité routière (taux de mortalité, ampleur des accidents), des résultats intermédiaires (taux de port de la ceinture de sécurité, résistance à l'impact et la composition du parc automobile, conduite avec des facultés affaiblies), et les caractéristiques des pays (niveau de motorisation et densité de la population) (Gitelman, Doveh et Hakkert, 2010).

Les principales étapes de construction de l'IC énumérées dans le manuel *Handbook on constructing composite indicators* sont (OECD, 2008) : (1) cadre théorique et conceptuel, (2) sélection des données, (3) imputation des données manquantes, (4) analyse multivariée, (5) la normalisation et (6) la pondération et l'analyse d'incertitude et de sensibilité. Ces principales étapes seront adaptées pour le développement de la méthodologie de l'IPFR.

Dans ce document, l'attention est portée sur le développement de l'IC en utilisant l'ACP. La construction des IC en utilisant l'ACP a été beaucoup exploitée dans des domaines scientifiques autres que les infrastructures routières. (Ouyang et al., 2006) se sont basés sur 16 indicateurs de qualité des eaux de surface en utilisant l'ACP pour évaluer les indicateurs plus influents

des variations saisonnières de qualité des eaux de surfaces. (Fuquan, Lu et Xiang, 2008) ont aussi utilisé des indicateurs caractérisant les facteurs de la sécurité routière des pays en utilisant l'ACP pour identifier les facteurs ayant des influences majeures et mineures et les caractéristiques du trafic routier. (Friesen, Seliske et Papadopoulos, 2016), pour leur part, ont utilisé l'ACP pour développer des indices des statuts socio-économiques pour mesurer les disparités socioéconomiques des communautés dans le but d'une bonne répartition des services de santé. Après une revue de la littérature approfondie, il a été trouvé qu'une seule étude a été effectuée dans la priorisation des infrastructures. En effet, (Marcelo et al., 2016) ont développé deux sous-indices à l'aide de l'ACP. Ces deux sous-indices développés, qui sont l'indice social et environnemental (ISE) et l'indice financier et économique (IFE), ont permis de représenter les projets sur un plan cartésien en considérant la limite budgétaire et déterminé les projets de haute priorité, de haute priorité sociale et environnementale, de haute priorité financière et économique et de faible priorité. Toutefois, cette étude ne spécifie pas si les hypothèses de l'ACP ont été satisfaites. De plus, les quatre dimensions n'ont pas été agrégées, et la détermination des niveaux de projets est très subjective. Toutes ces insuffisances ont été prises en compte pour le développement de l'IPFR.

3. SOURCE DES DONNÉES

Les données utilisées pour le développement de l'IPFR ont été collectées dans une administration routière de l'Afrique de l'Ouest. Cependant, l'échantillon statistique complet n'a pas été présenté dans cet article en raison de sa taille et pour des raisons de confidentialité des données exigées par cette administration.

4. ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude est située dans l'un des pays membres de l'union économique et monétaire ouest-africaine (UEMOA). L'union économique et monétaire ouest-africaine (UEMOA) est une organisation africaine créée en 1962 dont les pays membres sont le Bénin, le Burkina Faso, la Côte d'Ivoire, la Guinée-Bissau, le Mali, le Niger, le Sénégal et le Togo (BOAD, 2015). La carte présentée dans la figure 1 représente l'étendue de l'Afrique de l'Ouest dont une des régions en jaune représente la zone d'étude. Le linéaire total du réseau routier de l'espace UEMOA est de 247 311 km de routes classées dont une bonne partie se trouve en mauvais état (BOAD, 2015). D'une manière générale, le réseau routier est composé des routes classées et des routes non classées. Les routes classées comprennent les routes nationales

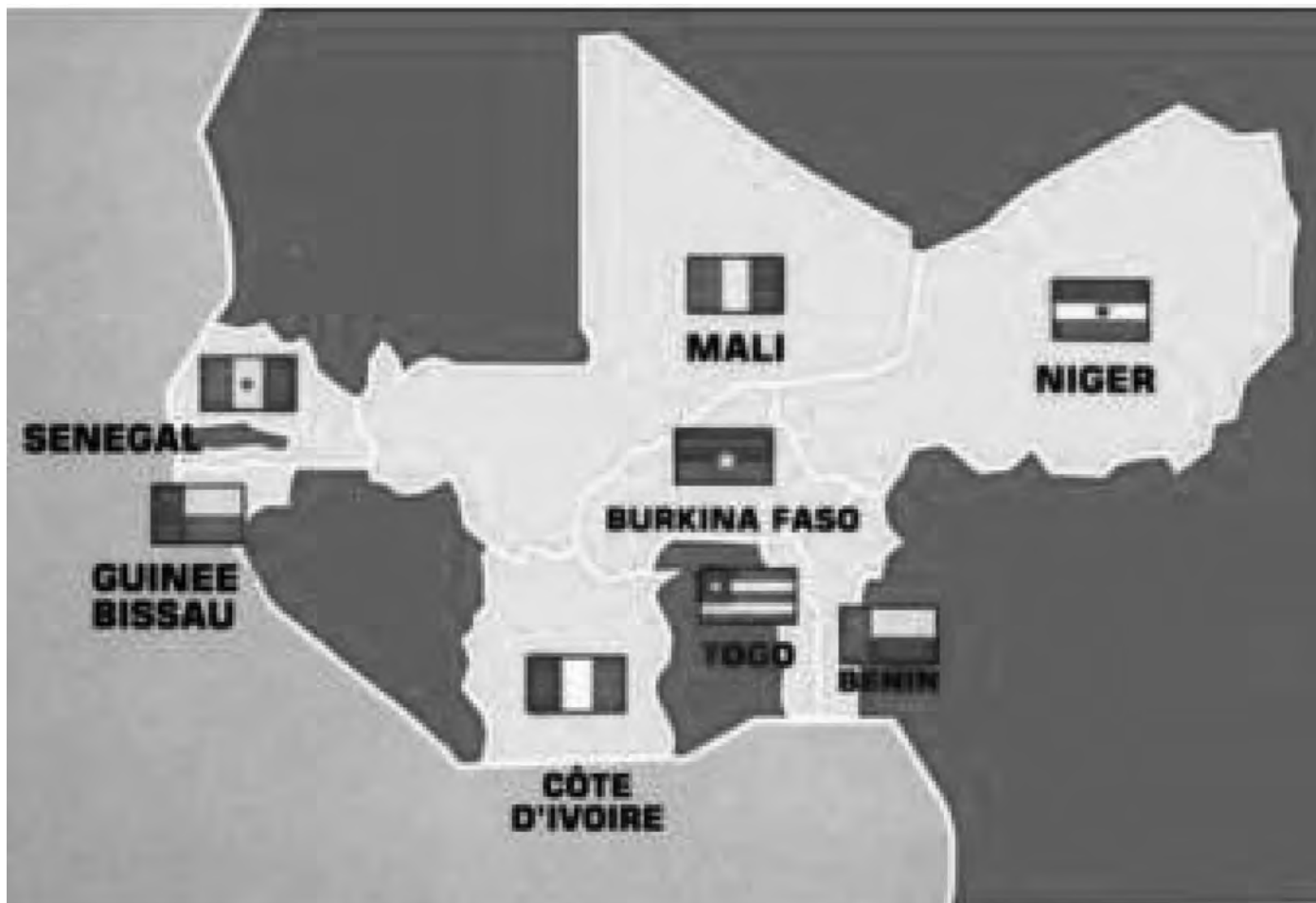


Figure 1 : Pays membres de L'UEMOA Tirée de BOAD (2005)

inter-états (RNIE) reliant la capitale du pays et les centres ruraux ou urbains des provinces du pays ou des pays limitrophes, et les routes nationales (RN) reliant les provinces entre elles, facilitant ainsi les échanges commerciaux des marchandises et le transport des personnes. Les routes non classées comportent des routes communales (RC) et des pistes rurales permettant l'accessibilité des infrastructures de bases comme les écoles, les hôpitaux, les marchés, etc., et permettent aussi de dynamiser les activités socioéconomiques des communautés rurales. Les types de revêtement sont aussi utilisés pour classer les routes. Ainsi, le réseau routier peut être subdivisé en routes revêtues et non revêtues. Les routes revêtues sont composées de routes en béton bitumineux (BB), en enduit superficiel monocouche (Esm) ou bicouche (Esb) et en Béton (très peu dans la zone UEMOA). Les routes non revêtues sont constituées des routes en graveleux latéritiques (GL) et des routes en terre (T). Dans cette étude, des tronçons de routes non revêtues en graveleux latéritiques totalisant une longueur 729 km et de routes

revêtues en béton bitumineux et enduit superficiel bicouche avec une longueur totale de 812 km ont été utilisés pour la construction de l'IPFR.

5. MÉTHODOLOGIE

Le développement de l'IPFR s'est appuyé sur le processus de construction des indices composites du manuel *Handbook on constructing composite indicators* publié en 2008 par l'organisation de coopération et de développement économiques (OECD, 2008), et a été adapté au domaine de l'Infrastructure routière. Comme présenté à la figure 2, les principales étapes de construction de l'IPFR ont été l'établissement d'un cadre théorique et conceptuel, suivi de la sélection des indicateurs pertinents, la transformation des indicateurs catégoriels, la normalisation, le test de la corrélation, et de la signification, la pondération et l'agrégation et le calcul de l'IPFR.

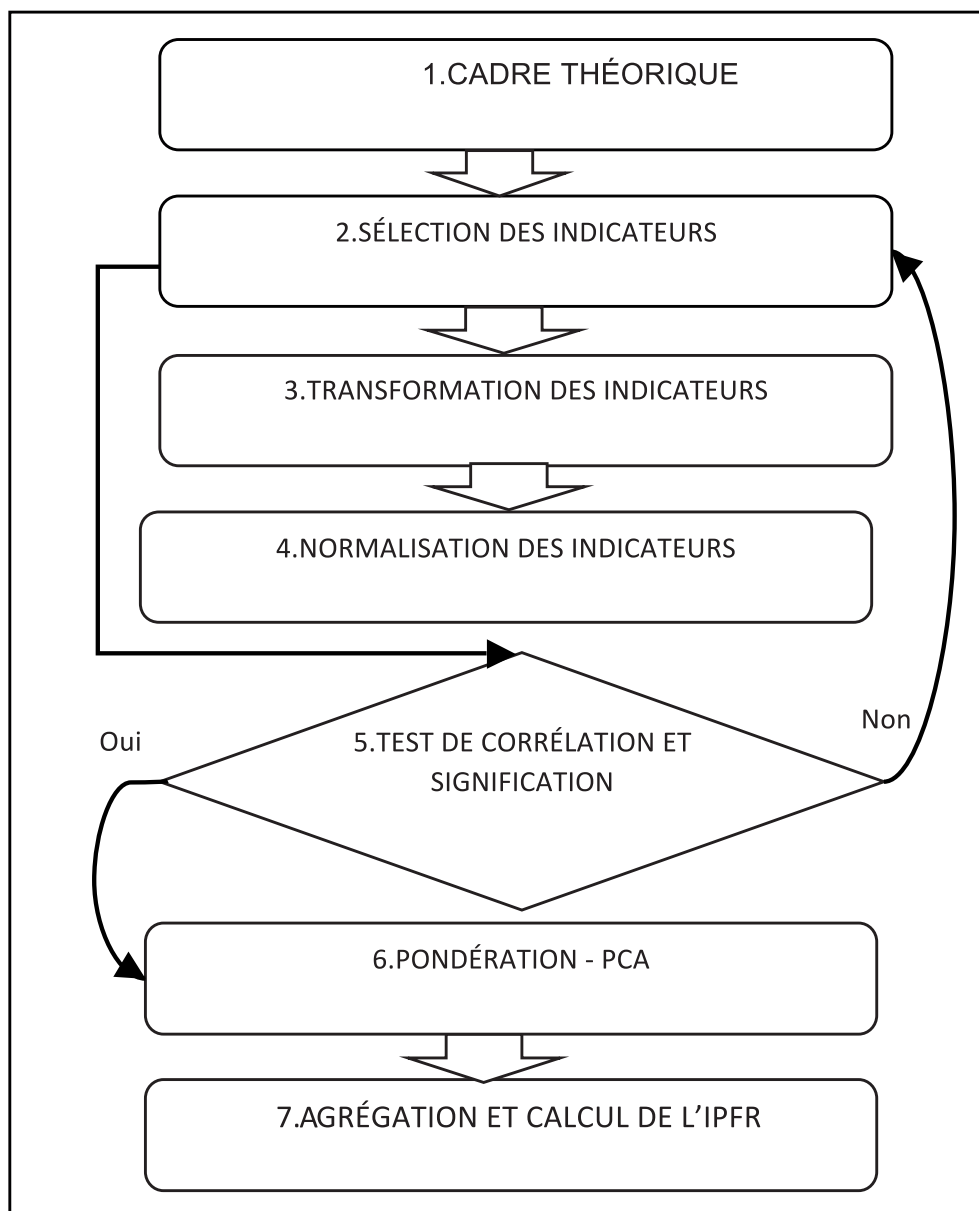


Figure 2 : Étapes de construction de l'IPFR

Tableau 1 : Cadre théorique et conceptuel de l'IPFR

Indice de Priorité de Financement des Routes (IPFR)				
Dimension	Impact	Indicateurs	Unité	Type de donnée
Technique	Bonne Performance	L	km	Quantitatif
		IRI	m/km	
		TJMA-VL	véh/h	
		TJMA-PL	véh/h	
Économique	Justifiable et rentable	CPCVEV	\$US/km	Quantitatif
		CPCVTT	\$US/km	
		RCCVU	\$US/km	
Sociale	Avantages élevés	POP	Habitants	Quantitatif
		SSB	n/a	
		M	n/a	
		UT	n/a	
Environnementale	Effets néfastes faibles	ZES	n/a	Qualitatif
		LPE	n/a	
		PE	n/a	
		ZE	n/a	

5.1. Étapes de construction de l'IPFR

5.1.1. Cadre théorique et conceptuel

Un cadre théorique et conceptuel adéquat permet de définir clairement le phénomène multidimensionnel à mesurer et ses dimensions, et constitue ainsi une référence pour la sélection des indicateurs et des méthodes de pondération (OECD, 2008). Ce cadre établit le lien entre les dimensions, les indicateurs et les sous-indicateurs. Le cadre théorique et conceptuel dans cette étude a été établi en sollicitant l'avis d'experts dans chacune des quatre (4) dimensions telles que des ingénieurs en conception et gestion des routes, des environnementalistes et des sociologues, ainsi que des experts du milieu universitaire. L'analyse pertinente des avis des différents spécialistes a permis d'établir le cadre théorique et conceptuel présenté au tableau 1. Ainsi, avec l'établissement de ce cadre, il est évident que pour être admissibles au financement, les projets doivent avoir des performances techniques fiables, être rentables et justifiables économiquement, avec des impacts négatifs minimes sur l'environnement et des avantages sociaux élevés pour la population locale. Deux types d'indicateurs ont été utilisés dans cette étude : il s'agit des indicateurs quantitatifs composés de valeurs continues et des indicateurs qualitatifs qui sont plutôt difficiles à quantifier comme les aspects sociaux et environnementaux. Ces

aspects sont appréciés à l'aide de l'échelle de Likert à 4 points allant de 1 pour très faible à 4 pour très élevé. Ces échelles sont présentées dans la section transformation.

5.1.2. Sélection des indicateurs

Les forces et les faiblesses des indicateurs composites sont étroitement liées aux critères de sélection des indicateurs. Afin de maximiser la qualité de l'ensemble des résultats finaux, la sélection devrait être basée sur la pertinence, la justesse, la disponibilité, l'accessibilité, la cohérence et l'interprétabilité des indicateurs (OECD, 2008). Les indicateurs ont été sélectionnés dans cette étude en mettant en évidence des critères de transparence, de précision, d'hypothèses des méthodes de pondération, de disponibilité, de pertinence et de développement durable applicables aux infrastructures routières dans le contexte des pays en développement. La méthode de pondération qui a été utilisée dans cette étude est l'analyse en composantes principales (ACP) dont la corrélation des indicateurs est une hypothèse fondamentale. Par conséquent, les indicateurs sont assez corrélés entre eux (voir tableau 2). Ces indicateurs sont issus principalement de plusieurs revues de littératures approfondies telles que des articles sur les indicateurs durables de priorisation de routes, des guides de conception, des rapports sur des études d'évaluation d'impacts sociaux et environnementaux de la Banque mondiale et de l'administration routière des pays en

Tableau 2 : Indicateurs sélectionnés pour l'établissement de l'IPFR

Sigle	Description	Référence
L	Longueur du tronçon de la route	(Haas <i>et al.</i> , 2009); (COST, 2007); (PIARC, 2004); (PIARC, 2012); (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994b); (Kumar, 2014)
IRI	Indice de Rugosité International	
TJMA-VL	Trafic Journalier Moyen des Véhicules Légers	
TJMA-PL	Trafic Journalier Moyen des Poids Lourds	
CPCVEV	Coût Pondéré de Cycle de Vie d'Exploitation des Véhicules	(Amiril <i>et al.</i> , 2014); (Bhandari, Shahi et Shrestha, 2016); (Mata <i>et al.</i> , 2013); (Mazziotta et Pareto, 2013); (Shen, Wu et Zhang, 2011); (Wirehn, Danielsson et Neset, 2015); (ADB, 2003); (BAFD, 2015); (FAD, 2001); (Lantran, Baillon et Pagès, 1994); (MCC, 2007); (World Bank, 2017)
CPCVTT	Coût Pondéré de Cycle de Vie du Temps de Trajet	
RCCVU	Réduction des Coûts de Cycle des Usagers	
POP	Population desservie	
SSB	Service Sociaux de Base	
M	Marché	
UT	Unité de transformation	
ZES	Zone Écologiquement Sensible	
LPE	Lieu de Passage d'Eau	
PE	Points d'eau	
ZE	Zone d'érosion	

développement. Un total de 15 indicateurs corrélés dont quatre (4) indicateurs techniques (3) indicateurs économiques, quatre (4) indicateurs sociaux et quatre (4) indicateurs environnementaux ont été sélectionnés.

Les descriptions plus détaillées de ces 15 indicateurs sélectionnés sont :

a) Longueur du tronçon (L)

Les longueurs des tronçons exprimées en mètre linéaire (ml) ont été obtenues en subdivisant le réseau routier en sections homogènes en se basant sur des critères comme la classe de la route (RNIE, RN, RC), le type de revêtement de surface de la chaussée (T, GL, BB et ES) et le trafic (TJMA-VL et TJMA-PL) et l'état (IRI).

b) Indice de rugosité internationale (IRI)

L'IRI exprimé en mètre par kilomètre (m/km) caractérise la régularité (UNI) de la surface de la chaussée liée au confort de roulement et à la sécurité des usagers. L'IRI se calcule à partir des mesures du profil longitudinal de chaussée à l'aide d'un système virtuel type-réponse de simulation de quart de voiture roulant à 80 km/h (COST, 2007). Une chaussée plate et en bon état est généralement caractérisée par une valeur d'IRI faible (par exemple IRI < 2 m/km), alors que plus la valeur de l'IRI

est élevée (IRI > 4 m/km), plus l'état de la route se détériore. Dans cette étude, les valeurs de l'IRI des tronçons de routes non revêtues (GL) sont comprises entre 8 et 20 m/km correspondant à un état bon à mauvais, alors que celles des routes revêtues (BB/ES) sont comprises entre 6 et 3.5 équivalant à un état bon à passable. Il est important de mentionner que les routes revêtues sont celles qui sont susceptibles de recevoir des interventions préventives. Cependant, la prévention des chaussées est plus rentable lorsque la chaussée est toujours effective, d'où la nécessité d'inclure dans le processus de sélection des projets routiers, des tronçons de route ayant des états variant de bon à passable.

c) Trafic moyen journalier annuel des poids lourds et de véhicules légers (TJMA-PL, TJMA-VL)

Le trafic normal, le trafic induit et le trafic détourné sont les trois principaux types de trafic fréquemment utilisés dans les analyses économiques des projets routiers. Le trafic normal est le nombre de véhicules circulant sur la route existante en l'absence du nouveau projet routier prévu ; le trafic induit est l'augmentation du nombre de véhicules dû à la réduction des coûts et de la durée du transport résultant de l'utilisation plus fréquente de la route existante après la réalisation du nouveau projet routier; le trafic détourné est issu de la déviation du trafic

des routes ayant la même origine et destination que la route du nouveau projet (Archondo-Callao, 2004). Les données du trafic sont généralement issues d'analyses de la demande de trafic routier et des campagnes de pesages des véhicules en considérant les variations saisonnières. Toutefois, pour cette étude, les données existantes du trafic normal de chaque tronçon (TJMA-PL et TJMA-VL) exprimées en nombre de véhicules par jour ont été collectées. Ces données du trafic routier sont composées du trafic normal des véhicules lourds (TJMA-PL) et du trafic normal des véhicules légers (TJMA-VL). Les véhicules lourds (poids lourds) sont des véhicules motorisés ayant une charge totale supérieure à 3.5 tonnes tandis que les véhicules légers ont une charge totale inférieure à 3.5 tonnes (Kerali et Odoki, 2006).

d) Coût pondéré de cycle de vie d'exploitation des véhicules (CPCVEV)

Le coût pondéré de cycle de vie d'exploitation des véhicules est constitué des coûts d'exploitation des véhicules (CEV) pondérés par le trafic projeté sur une durée de vie de 20 ans en considérant un taux de croissance de 4%. Les coûts de carburant, de lubrifiants, de changement d'huile, des pièces à rechange, de pneu, d'entretien, de l'amortissement et de l'équipage formant les CEV varient en fonction des caractéristiques géométriques de la route (rugosité, altitude, déclivité, etc.). Dans cette étude, le CPCVEV exprimé en USD/km a été estimé approximativement en utilisant les outils développés par la Banque mondiale (World Bank, 2006) pour le calcul des CEV (RED-VOC HDM-4).

e) Coût pondéré de cycle de vie de temps de trajet (CPCVTT)

Le coût pondéré de cycle de vie de temps de trajet (CPCVTT) exprimé en \$USD/km est le produit du temps du trajet et du coût de temps de trajet pondérés par le trafic total en considérant un cycle de vie de 20 ans et un taux de croissance de 4%. En plus de l'état de la route (IRI), la détermination du temps du trajet prend en compte le trajet effectué pendant les heures de travail et hors des heures de travail et le temps du trajet de transport des marchandises. Le coût du temps des trajets effectués durant les heures de travail est déterminé en se basant sur les taux salariaux, alors que celui du temps des trajets effectué hors des heures de travail est fondé sur la volonté des usagers à payer pour réduire la durée de leurs trajets dans le but d'utiliser cette durée pour leurs loisirs (DFID, 2002). Dans cette étude, le coût du temps de trajet a été déterminé à l'aide du modèle (HDM-RUC) de la Banque mondiale (World Bank, 2006) en considérant les valeurs de l'IRI des tronçons de route de la zone du projet. Le modèle de la détermination du CPCTT est *HDM-RUC* dont les intrants sont issus du fichier *World Bank Road Use Costs Study Results – Africa* des outils de la Banque mondiale (World Bank, 2006).

f) Réduction des coûts pondérés de cycle de vie des usagers (RCCVU)

La réduction des coûts de cycle de vie des usagers constitue la majeure partie des avantages des projets routiers. Ces coûts composés des coûts d'exploitation des véhicules, les coûts de temps de trajet et des coûts des accidents ont été évalués en comparant l'alternative de base (sans projet) et l'alternative avec le projet. Le RCCVU dans cette étude a été calculé en utilisant le

même modèle que celui de CPCVEV et de CPCVTT en assumant qu'avec l'alternative de base, les valeurs de l'IRI des tronçons sont celles qui ont été collectées auprès de l'administration routière concernée et que l'alternative avec projet permettrait d'avoir des valeurs d'IRI de 2 m/km à la suite de construction ou d'interventions préventives sur les tronçons.

g) Population (POP)

La population se rapporte à la démographie. Cependant, elle englobe un éventail de problèmes liés ses caractéristiques et à son dynamisme (taille, densité, genre, âge, migration urbaine/rurale, etc.), à l'éducation, à la santé, à la croissance économique, à l'agriculture et aux ressources naturelles (ADB, 2003). Dans cette étude, l'indicateur POP est le nombre d'habitants desservis par le tronçon de route se trouvant dans la zone d'influence du projet.

h) Services sociaux de base (SSB)

Les services sociaux de base sont principalement les infrastructures communautaires de bases composées des écoles, des marchés, des centres de santé, etc. La construction ou la préservation fournit une meilleure accessibilité à ces infrastructures de base en assurant la desserte permanente entre les villages et provinces ainsi que le développement du commerce local. Dans cette étude, l'indicateur SSB a été évalué qualitativement en se basant sur le nombre d'infrastructures de base à proximité du tronçon considéré.

i) Marché (M)

Les marchés sont inclus dans les infrastructures de base, mais les experts ont trouvé pertinent d'ajouter un indicateur Marché (M) qui prendra en considération uniquement le nombre de marchés agricoles traversés par le tronçon considéré pour promouvoir l'agriculture locale. L'indicateur M a été déterminé qualitativement en se basant sur le nombre de marchés agricoles traversés par les tronçons.

j) Unité de transformation (UT)

L'indicateur UT a été choisi dans l'optique de promouvoir les zones à hautes potentialités agricoles. L'indicateur UT a été déterminé en fonction des unités de transformation (usines, moulins, etc.) à proximité des tronçons.

k) Zone écologiquement sensible (ZES)

Les zones écologiquement sensibles (ZES) sont les endroits critiques de protection de l'écosystème composé des zones humides, des aires protégées, la faune et la flore. L'indicateur ZES a été déterminé en se basant sur le nombre de zones sensibles traversées par les tronçons.

l) Lieu de passage d'eau (LPE)

Les lieux des passages d'eau sont les cours d'eau se trouvant dans la zone d'influence du projet ou à proximité des tronçons considérés. La prise en compte de ces cours d'eau est très importante, car si le drainage de la route est défectueux, en cas d'inondation les couches des chaussées sont fragilisées et dans certains cas la chaussée peut être complètement détruite. L'indicateur LPE a été déterminé en se basant sur le nombre de lieux de passage d'eau à proximité ou traversé par les tronçons.

m) Point d'eau (PE)

Les points d'eau (PE) sont les zones où sont localisés des bornes-fontaines, des abreuvoirs pour bétail, des forages, des mares et toutes retenues d'eau se situant dans la zone d'influence du tronçon. L'indicateur PE a été déterminé en basant sur le nombre de zones de points d'eau.

n) Zone d'érosion (ZE)

L'érosion des sols survient le plus souvent quand le système de drainage de la route est défaillant. Ainsi, une rupture de la chaussée peut survenir dans le cas où l'eau serait retenue sur la route, et lorsque les drains latéraux sont inexistantes pour résister aux fortes précipitations et aux inondations (USAID, 2014).

L'indicateur ZE a été déterminé en considérant le nombre de zones d'érosion à proximité des tronçons.

5.1.3. Transformation des indicateurs qualitatifs en échelle ordinale

Les indicateurs continus ou quantitatifs, les indicateurs discrets ou qualitatifs et les indicateurs chronologiques sont les trois (3) principaux types d'indicateurs requis pour une analyse statistique multivariée (Jambu, 1991). Les indicateurs quantitatifs sont des indicateurs qui peuvent prendre toutes les valeurs possibles des nombres réels. Un indicateur qualitatif se définit comme étant les indicateurs qui peuvent prendre des nombres finis de valeurs numériques, de catégories ou de codes ; les

Tableau 3 : Transformation des variables en échelle ordinales

Indicateur	Échelle ordinale	Appréciation	Description
SSB	3	Élevé	Le nombre de services sociaux de base à proximité du tronçon supérieur ou égal à 4
	2	Moyen	Le nombre de services sociaux de base à proximité du tronçon compris entre 2 et 4
	1	Faible	Le nombre de services sociaux de base à proximité du tronçon inférieur à 2
M	3	Élevé	Le nombre de marchés traversés par le tronçon supérieur ou égal à 2
	2	Moyen	Le nombre de marchés traversés par le tronçon inférieur à 2
	1	Faible	Le tronçon ne traverse aucun marché
UT	3	Élevé	Le nombre d'unités de transformation à proximité du tronçon supérieur ou égale à 2
	2	Moyen	Le nombre d'unités de transformation à proximité du tronçon inférieur à 2
	1	Faible	Absence d'unité de transformation à proximité du tronçon
ZES	1	Élevé	1 zone et +
	2	Faible	0 zone
LPE	1	Très élevé	+ de 3 lieux
	2	Élevé	De 2 à 3 lieux
	3	Moyen	1 lieu
	4	Faible	0 lieu
PE	1	Élevé	+ 3 de zones
	2	Moyen	De 2 à 3 zones
	3	Faible	1 zone
	4	Négligeable	0 zone
ZE	1	Élevé	+ de 3 zones
	2	Moyen	De 2 à 3 zones
	3	Faible	1 zone
	4	Négligeable	0 zone

variables chronologiques sont des variables qui sont soit quantitatives ou qualitatives mesurées à des intervalles égaux. Les mesures des indicateurs en échelles primaires sont indispensables aux analyses statistiques multivariées à l'aide du logiciel SPSS. Les échelles primaires sont composées d'échelles nominale, ordinale, d'intervalles et de proportions (Malhotra, 2011). Cependant, l'ACP a été utilisé pour la pondération des indicateurs dans cette étude et requiert que les données soient mesurées en échelles ordinales et d'intervalle. Par conséquent, les indicateurs qualitatifs SSB, M, UT, ZES, LPE, PE et ZE qui étaient en échelle nominale ont été transformés en échelle ordinale comme cela est présenté dans le tableau 3. Toutefois, les indicateurs environnementaux (ZES, LPE, PE, ZE) ont été mesurés en échelle ordinale inversée (tableau 3). L'échelle a été inversée dans la perspective de minimiser les impacts environnementaux néfastes en pénalisant ainsi leurs indicateurs en nombre de points. Par conséquent, plus la valeur de l'indicateur est faible plus les risques environnementaux sont faibles.

5.1.4. Normalisation des indicateurs

La normalisation est la transformation des indicateurs en nombres adimensionnels pour les rendre comparables. Les indicateurs sont hétérogènes en raison de la différence de leurs unités et de leurs échelles de mesure. Donc, il convient d'établir une structure de comparaison commune de tous les indicateurs avant l'utilisation de l'analyse en composante principale. Dans cette étude, les valeurs des indicateurs ont été normalisées en utilisant la méthode de normalisation z-score telle que présentée par l'équation 1.

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \mu_j}{\sigma_j} \quad (1)$$

Où

Z_{ij} : Valeur normalisée selon ma méthode z-scores de l'indicateur j du projet i

X_{ij} : Valeur de l'indicateur j du projet i

μ_j : Moyenne de l'indicateur j des projets i

σ_j : Écart-type de l'indicateur j des projets i

La normalisation z-score consiste à convertir tous les indicateurs à la même échelle selon la loi de distribution normale de moyenne 0 et d'écart 1 (OECD, 2008). En plus d'avoir des propriétés théoriques pertinentes comme la symétrie et les mesures de tendance centrales identiques (Malhotra, 2011), la loi de distribution normale est la plus convenable et préconisée pour la normalisation des indicateurs utilisés ultérieurement pour l'ACP (Jambu, 1991), d'où le choix de cette méthode dans cette présente étude.

5.1.5. Le test de corrélation et de signification

Le but de cette analyse est de développer l'IPFR en se basant sur l'analyse l'ACP. Cependant, cette technique n'est applicable que si certaines hypothèses fondamentales sont satisfaites. Parmi ces hypothèses, il y a l'exigence que les données soient quantitatives, assez corrélées, linaires, distribuées selon la loi normale et en taille suffisante. Il existe plusieurs tests incorporés dans le logiciel SPSS pour valider ces hypothèses. Dans cette étude, pour s'assurer que ces hypothèses ont été validées, les données catégorielles ont été transformées en échelle ordinale puis l'ensemble des données sont normalisées selon la loi

normale avant de procéder à deux tests importants : l'indice d'adéquation Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) et le test de sphéricité (p-value) de Barlett. Dans le cas où le KMO est supérieur à 0.5 et le p-value à 5% (Malhotra, 2011), les hypothèses sont validées et l'étape suivante qui est la pondération des indicateurs peut être effectuée avec l'ACP. Dans le cas où les hypothèses ne sont pas validées, l'ACP n'est pas applicable et les indicateurs présentant des corrélations faibles peuvent être supprimés dans l'étape sélection des indicateurs. Toutefois, la suppression doit se faire toujours en se basant sur le cadre théorique et conceptuel pour éviter de soustraire l'analyse des indicateurs pertinents. En ce qui concerne la taille des données, il n'y a pas de consensus clair, mais (Osborne et Costello, 2004) suggèrent que le nombre d'observations (projets routiers) soit toujours supérieur au nombre de variables (indicateurs) et recommandent dans la limite du possible l'utilisation d'une taille de données toujours élevée pour minimiser la probabilité des erreurs, maximiser la précision d'évaluation de la probabilité statistique et accroître la généralité des résultats obtenus. L'analyse peut aussi adopter des techniques de pondération participatives comme l'AHP, le processus d'allocation de budget (BAP) et l'analyse conjointe (CA).

5.1.6. Pondération

Les hypothèses de l'ACP ayant été validées, la prochaine étape est la détermination des poids relatifs à chaque indicateur en utilisant l'ACP. L'ACP a été utilisé pour la pondération principalement en raison de sa capacité d'explorer les propriétés sous-jacentes des données par l'utilisation des techniques statistiques rigoureuses et de vérifier la multidimensionnalité du phénomène.

a) Théorie de la méthode de l'analyse en composantes principales (PCA)

L'analyse en composantes principales (ACP) est une variante de l'analyse factorielle, les deux méthodes étant des techniques statistiques de l'analyse multivariée. La méthode PCA est une technique de simplification ou de réduction de variables quantitatives corrélées afin d'obtenir un plus petit nombre de variables non corrélées nommées « composantes principales », qui sont des combinaisons linéaires des variables initiales. Les composantes principales étant des subdivisions de la variance totale des variables initiales, la première composante (C_1) est la combinaison linéaire des variables initiales dont la contribution à la variance totale est la plus élevée comme le montre l'équation 2 (Jambu, 1991; Li *et al.*, 2012; Malhotra, 2011; OECD, 2008; Pituch et Stevens, 2016). La deuxième composante principale non corrélée (C_2), représentée par l'équation 3, est établie de telle sorte qu'elle compte pour la deuxième contribution à la variance totale la plus élevée et ainsi de suite pour l'obtention des autres composantes principales (C_p) (équation 4) jusqu'au nombre, limite p.

$$C_1 = W_{11}Z_1 + W_{12}Z_2 + \dots + W_{1p}Z_p \quad (2)$$

$$C_2 = W_{21}Z_1 + W_{22}Z_2 + \dots + W_{2p}Z_p \quad (3)$$

$$C_p = W_{p1}Z_1 + W_{p2}Z_2 + \dots + W_{pp}Z_p \quad (4)$$

C_1, C_2, C_p sont les composantes principales retenues, P est le nombre de composantes principales retenues qui constituent la plus grande partie de la variance totale des variables initiales normalisées Z_1, Z_2, Z_p . W_{11}, W_{21}, W_{n1} qui sont les coefficients de pondération ou scores factoriels des composantes principales. Dans le cas où les scores factoriels sont transformés de telle sorte que $W_1^T W_1 = 1$ avec $W_1 = W_{11}, W_{12}, \dots, W_{1p}$, la variance C_1 est égale à la valeur propre la plus élevée de la matrice de covariance de l'échantillon utilisé. Par conséquent, la plus grande valeur propre du vecteur propre équivaut aux scores factoriels de C_1 et ainsi de suite pour C_n (Pituch et Stevens, 2016). En bref, le but visé de cette analyse ACP est l'obtention d'un nombre de facteurs principaux relativement faibles occupant la plus grande partie de la variance totale des variables initiales. L'ACP a été réalisé en utilisant le logiciel *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS). La prochaine étape après l'extraction des composantes principales est la détermination du nombre de composantes à retenir.

b) Le nombre de composantes principales à retenir

Les critères de détermination du nombre de composantes principales à retenir qui ont été utilisés dans cette étude sont les suivants : le critère de Kaiser, le test du coude, le critère de la variance expliquée.

- Critère de Kaiser : En utilisant ce critère, les composantes principales, dont les valeurs propres supérieures 1, sont uniquement retenues. La variance de la composante principale est représentée par sa valeur propre. Après la normalisation des indicateurs initiaux, leurs variances sont égales à 1. Par conséquent, toute valeur propre inférieure à 1 n'est pas retenue parce qu'il n'est pas pertinent d'ajouter une composante principale dont la variance est inférieure à la variance expliquée par un indicateur.
- Test du Coude : Cette méthode du coude de (Cattell et Vogelmann, 1977) consiste à dresser un graphique des valeurs propres en fonction du nombre de composantes principales et à utiliser la forme du graphique pour trouver le nombre de composantes principales à retenir. Le graphique comporte une partie dont une cassure nette assortie d'une pente raide est observée pour les grandes valeurs propres et une partie déclinant progressivement vers le bas pour les autres valeurs propres. Le point de changement de concavité correspond en général au nombre de composantes principales à retenir.
- Critère de la variance expliquée : Les composantes principales contribuant à moins 60% de la variance totale sont retenues (Malhotra, 2011). Selon l'objectif de l'analyse, une contribution de 80% ou 90 % de la variance totale peut être requise (OECD, 2008).

c) La rotation des composantes principales

La rotation des composantes principales retenues facilite l'interprétation des résultats de l'ACP. La rotation consiste en un changement des axes (composantes principales) afin que chaque axe soit très corrélé avec certains indicateurs initiaux et peu corrélé avec les autres indicateurs. Les rotations sont subdivisées en deux catégories (Pituch et Stevens, 2016) : les rotations orthogonales composées des rotations *Quatrimax*, et *Varimax*, et les rotations obliques composées des rotations dont les plus importantes sont les rotations *Oblimin* et *Promax*. Dans cette

présente étude, la rotation *varimax* a été utilisée pour faciliter l'interprétation des résultats de l'ACP. *Varimax* est une méthode de rotation orthogonale qui minimise le nombre d'indicateurs très corrélé avec chacune des composantes principales pour simplifier l'interprétation des composantes principales. Les coefficients de corrélations entre chacune des composantes principales et les indicateurs initiaux après la rotation sont nommés loading et sont utilisés pour l'identification des indicateurs explicatifs. Le logiciel SPSS a été utilisé pour effectuer l'ACP avec rotation *varimax*.

d) Détermination des indicateurs explicatifs et des coefficients de pondération des composantes principales

Les indicateurs explicatifs sont des indicateurs ayant des loading significatifs après la rotation des composantes principales. (Malhotra, 2011) suggère de considérer comme indicateurs explicatifs de chaque composante principale les indicateurs dont les loading sont les plus élevés. Les règles de détermination des indicateurs explicatives sont basées sur des considérations empiriques et peuvent être ajustées en fonction de l'objectif de l'analyse. Dans cette étude, les indicateurs explicatifs de chaque composante principale sont ceux dont les loading après rotation *varimax* sont supérieurs à 0.5.

e) Détermination des poids des indicateurs

Les poids donnent des indications sur l'importance relative de chaque indicateur dans la construction de l'IPFR. Le nombre de composantes principales retenues est le paramètre le plus important dans l'établissement des poids des indicateurs. Dans cette étude, le poids de chaque indicateur a été calculé en faisant le produit du score factoriel (coefficient de pondération) après rotation de l'indicateur explicatif et sa variance. Les équations 5 et 6 ont été utilisées pour la détermination des poids de chaque indicateur.

$$A_j = W_{jp} N_p \quad (5)$$

$$N_p = \frac{V_p}{\sum_{n=1}^p V_p} \quad p < n \text{ et } \forall j \quad (6)$$

Où

A_j : le poids de l'indicateur j

n : le nombre d'indicateurs

p : le nombre de composantes principales

j : le nombre d'indicateurs explicatifs

W_j : coefficient de pondération ou score factoriel de l'indicateur explicatif j de la composante principale p

N_p : Proportion de variance expliquée normalisée de la composante principale p

V_p : Proportion de variance expliquée par la composante principale p

5.2. Agrégation et calcul de l'indice de priorité de financement des routes (IPFR)

Les agrégations permettent de combiner les indicateurs et leurs différents poids en utilisant des méthodes d'agrégation linéaires ou géométriques pour la détermination du score total de chaque

projet. Dans cette étude, il a été assumé que les scores totaux des projets sont proportionnels au poids des indicateurs et que les indicateurs pouvaient se compenser entre eux, d'où le choix de la méthode d'agrégation linéaire. Les scores totaux des projets ont été calculés en utilisant l'équation 7.

$$IC_i = \sum_{j=1}^n A_j Z_{ij} \quad (7)$$

Où

IC_i : score total du projet i

A_j : poids de l'indicateur j

Z_{ij} : valeur normalisée de l'indicateur j du projet i

5.2.1. Calcul de l'IPFR

L'indice IPFR a été établi en mettant en échelle de 0 et 100 le score total. Dans cette étude, l'IPFR de chaque projet a été calculé par l'équation 8.

$$IPFR_i = \frac{IC_i - IC_{imin}}{IC_{imax} - IC_{imin}} \times 100 \quad (8)$$

Où

$IPFR_i$: indice de priorité de financement des routes du projet i compris entre 0 et 100.

IC_i : score total du projet i

IC_{imin} : score total minimum de l'ensemble des projets i

IC_{imax} : score total maximum de l'ensemble des projets i

6. RÉSULTATS ET DISCUSSION

6.1. Corrélations des indicateurs

Une bonne corrélation entre les indicateurs initiaux est requise pour l'utilisation de l'ACP. De plus, la multicolinéarité des indicateurs initiaux s'avère une condition nécessaire à l'interprétation des résultats de l'ACP. L'indice d'adéquation KMO et le test de sphéricité de Bartlett sont fréquemment utilisés comme des critères de vérification du degré de corrélation et de la multicolinéarité des indicateurs initiaux. Comme présenté dans le tableau 4, l'indice KMO est de 0.637, ce qui est supérieur à 0.5 (Malhotra, 2011) et l'hypothèse nulle est rejetée puisque le test de sphéricité de Bartlett donne un khi-deux de 464,976 avec 6 degrés de liberté significatifs à 5% (p-value inférieur à 5%). Par conséquent, l'ACP est approprié à cette étude. Certains analystes dans leurs travaux de recherches ne recommandent l'application de l'ACP que si le KMO est au moins égal à 0.6 (Antony et Rao, 2007). Avec un KMO de 0.637 (tableau 4),

cette condition est satisfaite. En plus de la corrélation et de la multicolinéarité, les données de l'échantillon statistique de cette étude sont toutes quantitatives puisqu'elles ont été transformées et normalisées. En outre, l'échantillon de cette étude a été composé avec 50 projets routiers (25 projets de construction et 25 projets de préservation) et de 15 indicateurs dont le rapport projet sur indicateur est supérieur à 3 :1 suggéré par (OECD, 2008). Le rapport 3 :1 est aussi supérieur au rapport 2 :1 recommandé par (Costello et Osborne, 2005). En somme, l'ACP est applicable aux données de cette étude et les résultats interprétables.

6.2. Nombre de composantes principales retenues

L'interprétation des résultats de l'ACP commence par la détermination du nombre de composantes principales à retenir. Puisqu'il y a autant de composantes que de nombres d'indicateurs, certains critères devront être appliqués pour extraire le nombre de composantes principales pertinentes à l'étude. Le tableau 5 présente les résultats de l'extraction des composantes avec une rotation *varimax* pour faciliter l'interprétation. Les cinq (5) premières composantes sont les composantes principales conformément au critère de Kaiser, étant donné que leurs valeurs propres sont toutes supérieures à 1. La contribution à la variance totale des composantes principales 1, 2, 3, 4 et 5 est respectivement de 21.75%, 17%, 12.79%, 11.65% et 10.45 %. Ainsi, les cinq (5) premières composantes contribuent à 73,64 % de la variance totale, ce qui est supérieur à 60% de la variance totale (Malhotra, 2011). Par conséquent, d'après le critère de la variance expliquée, les cinq (5) premières composantes sont encore retenues comme composantes principales. Le nombre de composantes principales peut aussi être déterminé par le critère de (Cattell et Vogelmann, 1977) en observant le graphique des valeurs propres représenté dans la figure 3. Ce faisant, un changement abrupt est décelé après la sixième (6^e) composante représentée par une cassure nette. Ainsi, toutes les composantes situées avant la cassure nette sont les composantes principales à retenir dont le nombre est de 5. Donc, les trois (3) critères convergent tous vers 5 composantes principales, ce qui signifie que tous les 15 indicateurs initiaux peuvent être représentés par seulement 5 composantes principales. Il est très rare que le nombre de composantes principales soit égal au nombre des dimensions spécifiées dans le cadre théorique et conceptuel, étant donné que le nombre de composantes principales à retenir est basé purement sur des critères statistiques alors le nombre de dimensions dépend des considérations des experts multidisciplinaires et des décideurs (bailleur de fonds et administration routière). Néanmoins, en

Tableau 4 : Indice KMO et Test de sphéricité de Bartlett

Indice de KMO (Kaiser-Meyer-Olkin)		0,637
Test de sphéricité de Bartlett	Khi-deux	464,976
	Degré de liberté	105
	Signification	0,000

considérant le loading le plus élevé dans chacune des composantes principales, les composantes 1 et 4 peuvent être qualifiées de *technique*, la composante 2 d'environnementale et les composantes 3 et 5 de *sociaux*. De plus, le fait de trouver plusieurs composantes principales indique clairement la nature multidimensionnelle du phénomène mesuré. Donc, la considération d'une seule composante principale n'est pas recommandée pour l'établissement des poids des indicateurs. À la suite de la détermination des cinq (5) composantes principales, la

prochaine étape est l'identification des indicateurs explicatifs et la détermination des poids des indicateurs initiaux.

6.3. Indicateurs explicatifs et coefficients de pondération des composantes principales

Les indicateurs explicatifs sont des indicateurs initiaux donc les loading sont supérieurs à 0.5. En rappel, les loading sont

Tableau 5 : Résultats de l'extraction des composantes principales avant et après rotation

Composante	Valeurs propres initiales			Sommes extraites du carré des chargements			Sommes de rotation du carré des chargements		
	Total	% de la variance	% cumulé	Total	% de la variance	% cumulé	Total	% de la variance	% cumulé
1	4,290	28,599	28,599	4,290	28,599	28,599	3,263	21,750	21,750
2	2,452	16,347	44,946	2,452	16,347	44,946	2,550	16,999	38,750
3	1,863	12,421	57,367	1,863	12,421	57,367	1,918	12,789	51,538
4	1,409	9,396	66,762	1,409	9,396	66,762	1,748	11,650	63,188
5	1,031	6,873	73,635	1,031	6,873	73,635	1,567	10,447	73,635
6	0,942	6,281	79,916						
7	0,715	4,768	84,684						
8	0,630	4,199	88,883						
9	0,458	3,052	91,934						
10	0,401	2,675	94,609						
11	0,377	2,515	97,124						
12	0,181	1,204	98,328						
13	0,147	0,978	99,306						
14	0,094	0,627	99,933						
15	0,010	0,067	100,000						

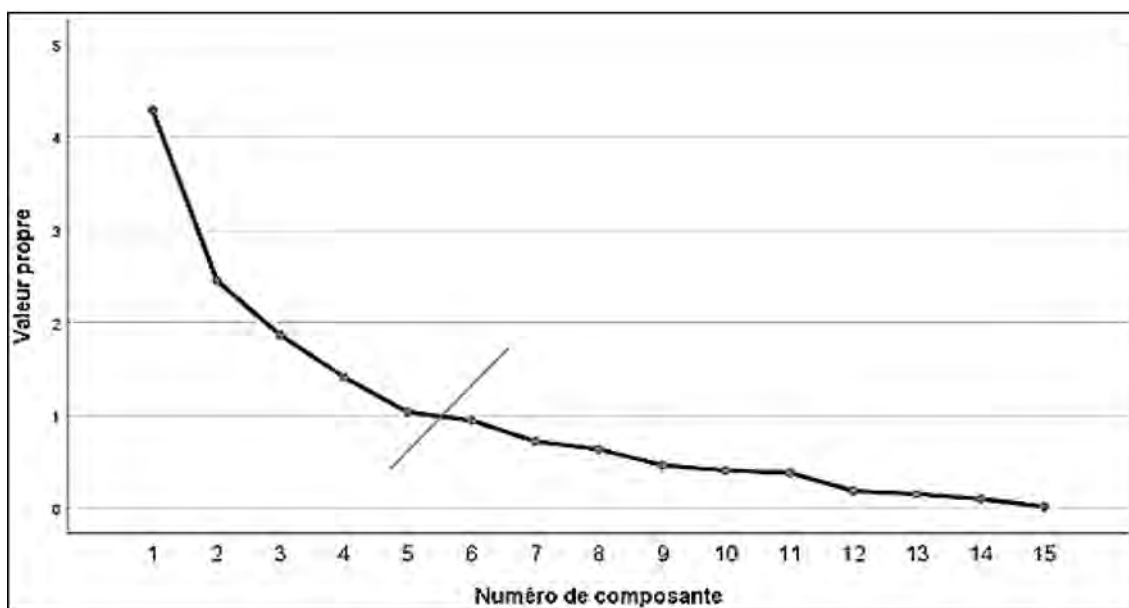


Figure 3 : Graphique des valeurs propres

des coefficients de corrélation entre les indicateurs initiaux et chaque composante principale et leurs valeurs sont comprises entre -1 et 1. La matrice des loading telle que présentée dans le tableau 6 a été obtenue après rotation *varimax* pour faciliter l'identification des indicateurs explicatifs (en italique et gras). Le signe négatif des valeurs de certains loading indique que la corrélation entre les indicateurs et de la composante principale est considérée est négative; ceci ne veut pas dire que la corrélation est faible, mais indique que les indicateurs de cette composante principale doivent être interprétés en sens inverse et que ces indicateurs contribuent négativement à la variance totale de la composante principale concernée. L'exemple du loading de l'indicateur PE présenté dans le tableau 6 prouve sa contribution négative à la composante principale 1. (Costello et Osborne, 2005) recommandent de considérer comme indicateurs explicatifs d'une composante principale les indicateurs dont les valeurs absolues des loading sont supérieures à 0.5. Des chercheurs comme (Doukas et al., 2012; Keeley et McDonald, 2015; Ouyang et al., 2006; Shrestha et Kazama, 2007) ont considéré comme indicateurs explicatifs les indicateurs initiaux ayant des loading au moins égaux à 0.8 dans leurs études. Cependant, le critère de loadings au moins égaux à 0.5 est le plus recommandé par les livres de référence (Freudenberg, 2003; Jambu, 1991) qui ont été consultés pour la réalisation de cette étude. Les indicateurs explicatifs peuvent alors être considérés comme les indicateurs les plus influents (positivement ou négativement) de chacune des composantes principales. Il est important de mentionner aussi qu'avec la rotation *varimax*, chaque indicateur explicatif correspond à une et une seule composante principale; ceci signifie qu'une composante principale peut avoir plusieurs indicateurs explicatifs, mais les cinq (5) composantes principales ne peuvent jamais avoir le même indicateur explicatif simultanément. Dans le cas échéant, l'interprétation et la

détermination des coefficients de pondération deviennent une tâche complexe. Ainsi, tels qu'indiqués dans le tableau 7, les indicateurs explicatifs de la composante principale 1 sont : TJMA-VL, CPCVEV, PE ; les indicateurs explicatifs de la composante principale 2 sont : IRI, RCCVU, SSB, ZES, LPE ; les indicateurs explicatifs de la composante principale 3 sont : M, UT ; les indicateurs explicatifs de la composante principale 4 sont : TJMA-PL, CPCVTT ; et les indicateurs explicatifs de la composante principale 5 sont : L, POP.

Après l'identification des indicateurs explicatifs dans le tableau 6, les coefficients de pondération ou scores factoriels (en italique et gras) correspondant à chaque indicateur explicatif sont identifiés dans la matrice des coefficients des composantes présentées dans le tableau 7. Ainsi, chaque composante principale est estimée par les équations 9, 10, 11, 12 et 13 suivantes :

$$C_1 = 0.297 Z_{TJMA-VL} + 0.250 Z_{CPCVEV} - 0.370 Z_{PE} \quad (9)$$

$$C_2 = 0.215 Z_{IRI} + 0.276 Z_{RCCVU} - 0.255 Z_{SSB} + 0.293 Z_{ZES} + 0.237 Z_{LPE} + 0.228 Z_{ZE} \quad (10)$$

$$C_3 = 0.493 Z_M + 0.374 Z_{UT} \quad C_3 = 0.493 Z_M + 0.374 Z_{UT} \quad (11)$$

$$C_4 = 0.554 Z_{TJMA-PL} + 0.358 Z_{CPCVTT} \quad (12)$$

$$C_5 = 0.507 Z_L + 0.553 Z_{POP} \quad (13)$$

La suite de l'analyse consiste maintenant à calculer le poids de chaque indicateur (coefficient de pondération globale) en se basant sur les cinq (5) composantes principales.

Tableau 6 : Matrice des loading : rotation Varimax

Indicateur	Composante				
	1	2	3	4	5
L	-0,226	-0,229	-0,060	0,262	0,754
IRI	-0,308	0,627	0,168	-0,502	0,074
TJMA-VL	0,905	-0,094	0,208	0,240	0,026
TJMA-PL	0,319	-0,163	-0,058	0,873	-0,009
CPCVEV	0,875	0,035	0,269	0,332	0,041
CPCVTT	0,495	0,129	0,425	0,595	0,287
RCCVU	0,256	0,641	0,515	-0,029	0,200
POP	0,205	0,133	0,030	-0,148	0,842
SSB	0,244	-0,647	0,292	0,012	0,057
M	-0,075	-0,178	0,842	-0,091	0,133
UT	0,192	-0,122	0,634	0,081	-0,225
ZES	-0,047	0,733	-0,032	-0,071	0,008
LPE	-0,452	0,531	-0,263	0,304	-0,284
PE	-0,844	0,021	0,158	-0,086	0,051
ZE	0,239	0,581	-0,176	-0,045	-0,060

Tableau 7 : Matrice des coefficients de pondération des composantes

Indicateur	Composante				
	1	2	3	4	5
L	-0,175	-0,068	-0,061	0,220	0,507
IRI	-0,032	0,215	0,125	-0,228	0,050
TJMA-VL	0,297	-0,009	-0,007	-0,048	-0,029
TJMA-PL	-0,078	0,013	-0,027	0,554	-0,020
CPCVEV	0,250	0,054	0,043	0,045	-0,025
CPCVTT	-0,014	0,122	0,195	0,358	0,129
RCCVU	0,032	0,276	0,266	0,006	0,079
POP	0,102	0,045	-0,103	-0,161	0,553
SSB	0,054	-0,255	0,113	-0,094	0,001
M	-0,146	-0,056	0,493	-0,008	0,009
UT	-0,033	-0,024	0,374	0,048	-0,217
ZES	0,003	0,293	0,004	0,025	0,013
LPE	-0,225	0,237	-0,021	0,380	-0,153
PE	-0,370	0,005	0,218	0,166	0,041
ZE	0,145	0,228	-0,124	-0,053	-0,025

6.4. Poids des indicateurs

Le poids de chaque indicateur représente son importance par rapport aux indicateurs dans la construction de l'IPFR. Des indicateurs ayant des poids élevés influencent plus l'IPFR que ceux ayant des poids faibles ou négatifs. Le tableau 8 présente la contribution à la variance totale des cinq (5) composantes principales retenues. Ces variances sont normalisées conformément à l'équation 6 comme cela est présenté dans le tableau 9. Ainsi, le poids chaque indicateur présenté dans le tableau 10 est le produit de l'indicateur explicatif et de la variance normalisée de sa composante principale correspondante comme cela est spécifié par l'équation 5. Des chercheurs comme (Antony et Rao, 2007; Krishnan, 2010) ont déjà utilisé une procédure

similaire pour déterminer les poids des indicateurs et ont conclu que cette méthode était pertinente et appropriée pour l'évaluation de l'importance des indicateurs en vue d'une utilisation ultérieure. Après la détermination des poids de chaque indicateur comme présenté dans le tableau 10, la prochaine étape est le calcul du score global de chaque projet routier.

6.5. Scores totaux des projets

Le score total de chaque projet routier déterminé par l'équation 7 de la section méthodologie est la combinaison linéaire des poids des indicateurs (tableau 10) et des valeurs normalisées des indicateurs. Les scores totaux des projets sont proportionnels aux

Tableau 8 : Variance expliquée des composantes principales

Composantes principales					
1	2	3	4	5	% de variance totale
21,75	17,00	12,79	11,65	10,45	73,64

Tableau 9 : Variance expliquée normalisée des composantes principales

Composantes principales normalisées					
1	2	3	4	5	% de variance totale
0,30	0,23	0,17	0,16	0,14	1,00

Tableau 10 : Coefficient de pondération global des indicateurs

Indicateurs	Poids ou coefficient de pondération
L	0,072
IRI	0,050
TJMA-VL	0,088
TJMA-PL	0,088
CPCVEV	0,074
CPCVTT	0,057
RCCVU	0,064
POP	0,078
SSB	-0,059
M	0,086
UT	0,065
ZES	0,068
LPE	0,055
PE	-0,109
ZE	0,053

poids des indicateurs. Par conséquent, plus les poids des indicateurs sont élevés et positifs, plus les scores totaux des projets seront élevés. À l’opposé des poids négatifs, des indicateurs produiront des scores totaux plus faibles. Comme présenté dans le tableau 10, les poids des indicateurs du trafic (TJMA-VL, TJMA-PL), de la population (POP), des coûts d’exploitation des véhicules (CPCVEV) et la longueur (L) sont les plus élevés (>0.07), donc ils influenceront positivement les scores totaux ; les poids des indicateurs IRI, CPCVTT, RCCVU, UT, ZES, LPE et ZE sont moyens et positifs (> 0,05 et < 0,07), donc ils exerceront une moyenne influence positive sur les scores totaux ; alors que les poids des indicateurs SSB et PE sont négatifs, donc ils contribueront à réduire considérablement les scores totaux des projets. Dans d’autres études, des indicateurs dont les poids étaient très faibles ont été exclus du calcul des scores totaux des projets (Farhan *et al.*, 2017). L’écart entre les poids n’est pas très élevé. Par conséquent, l’ensemble des poids des indicateurs sont utilisés pour le calcul des scores totaux des projets. La dernière étape subséquente au calcul du score total de chaque projet est l’établissement de l’IPFR.

6.6. Indice de priorité des financements (IPFR) et classements des projets routiers

L’IPFR de chaque projet consiste simplement en la mise en échelle de 0 à 100 de son score total en utilisant l’équation 8 présentée dans la section méthodologie. Les cinquante (50) projets routiers dont vingt-cinq (25) projets de construction et vingt-cinq (25) projets de préservation sont ensuite classés en ordre décroissant en fonction de leurs indices de priorité de financement comme présenté dans la figure 4 et 5 et 6. Les projets,

dont les codes, commencent par les lettres A et P sont respectivement des projets de construction et des projets de préservation. Les projets routiers sont par la suite subdivisés par niveau de priorité comme présenté dans le tableau 11. Ainsi, les projets de priorité « très élevée à moyenne » sont présentés dans la figure 4, « faible » dans la figure 4 et « très faible » dans la figure 5. Dans les figures 4, 5 et 6, le projet en couleur rouge représente le projet à niveau de priorité « très élevé », les projets en couleur orange ont un niveau de priorité « élevé », les projets en jaune ont un niveau de priorité « moyen », les projets en couleur en verte claire ont une priorité « faible », et les projets en couleur vert foncé ont un niveau de priorité « très faible ».

Tableau 11 : Niveau de priorité des projets

Niveau de Priorité	Plage de l’IPFR
Très élevé	85-100
Élevé	60-84
Moyen	40-59
Faible	15-39
Très faible	5-14

Les résultats montrent que l’IPFR ne favorise pas un type de projet précis (construction ou préservation) par rapport à un autre, mais plutôt les projets dont la somme des performances dans les quatre (4) dimensions (technique, économique, sociale et environnementale) est élevée. Comme présenté dans figure 4, le projet de préservation P1 (IPFR = 100%) est le projet routier dont le financement est le plus prioritaire, suivi du projet construction A10 (IPFR = 82.24%) et du projet de préservation P2 (IPFR = 75.73%).

La figure 7 présente les répartitions des projets routiers par niveau de priorité et par type de projet (construction et préservation). Comme présenté dans le graphique a), les proportions de chaque type de projet par rapport à l'ensemble des projets et les longueurs des projets par priorité «très élevée», «élevée», «moyen», «faible» et «très faible» sont respectivement de 2% et 9.77 km (P1), de 4% et 48.6 km (A10 et P2), de 24%

487.24 km (P18, P17, A11, A5, P7, A16, P16, A24, A23, P10, A18, P15), de 50% et 846 km (P14, A13, A7, P20, P24, P22, P1, P6, P3, A25, A14, A12, A9, P25, A2, P13, A20, A19, A6, P12, A17, P11, P8 et A21) et de 20% et 149.km (A15, A22, A8, A1, P9, P21, P4, A4, P5 et P23). Les projets de construction et préservation de priorité « très élevée à moyenne » représentent respectivement des proportions de 50% et 50 % avec

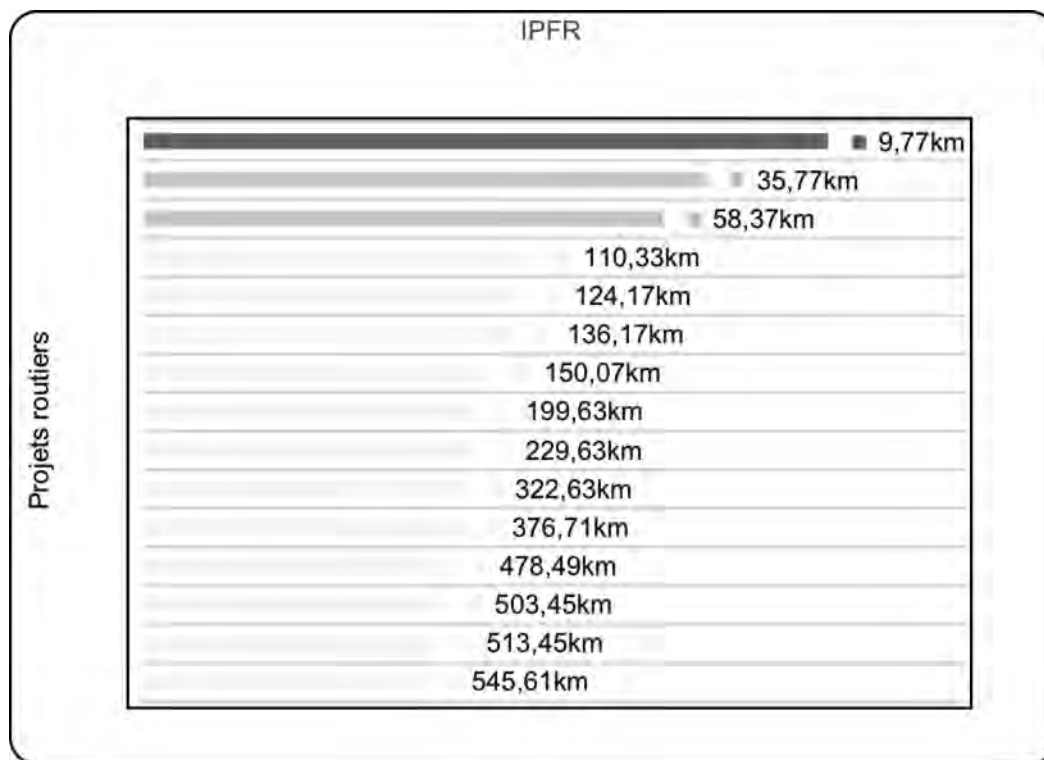


Figure 4 : IPFR des projets : Très élevé à moyen (40-100%)

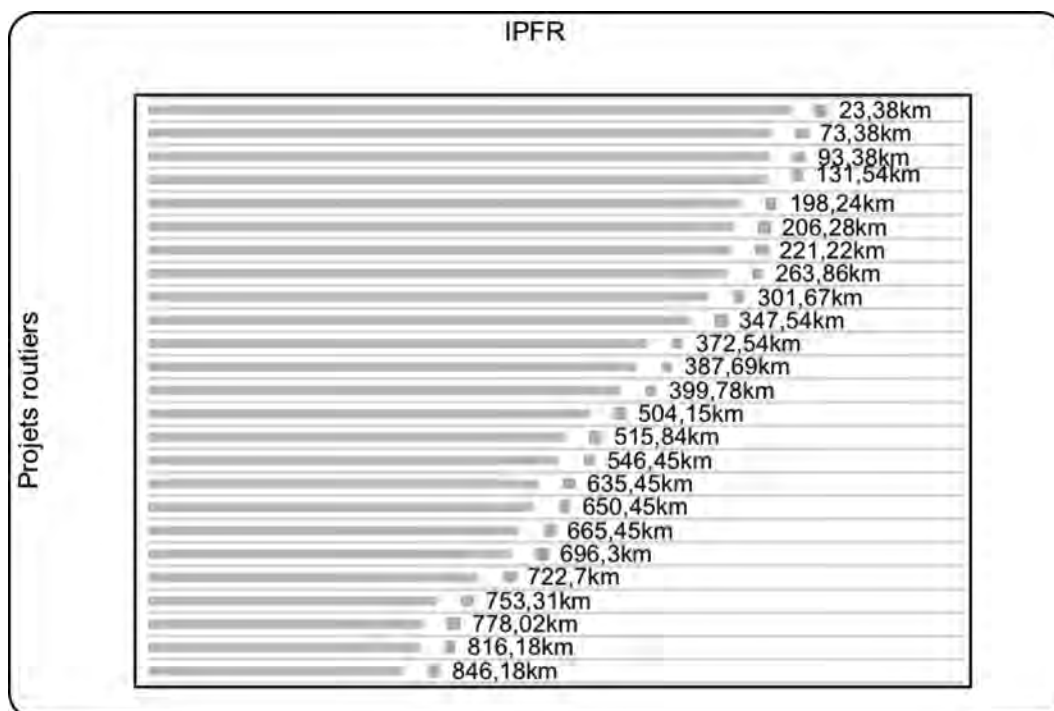


Figure 5 : Indice IPFR des projets : Faible (15-39%)

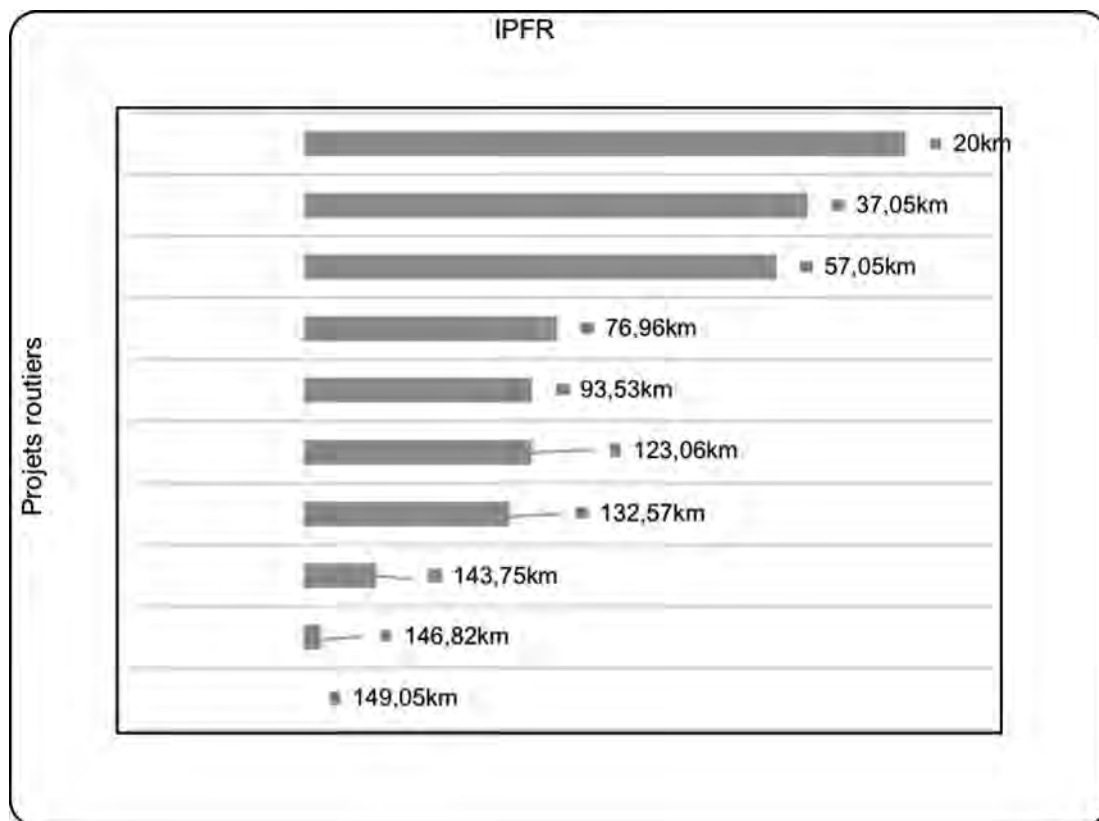
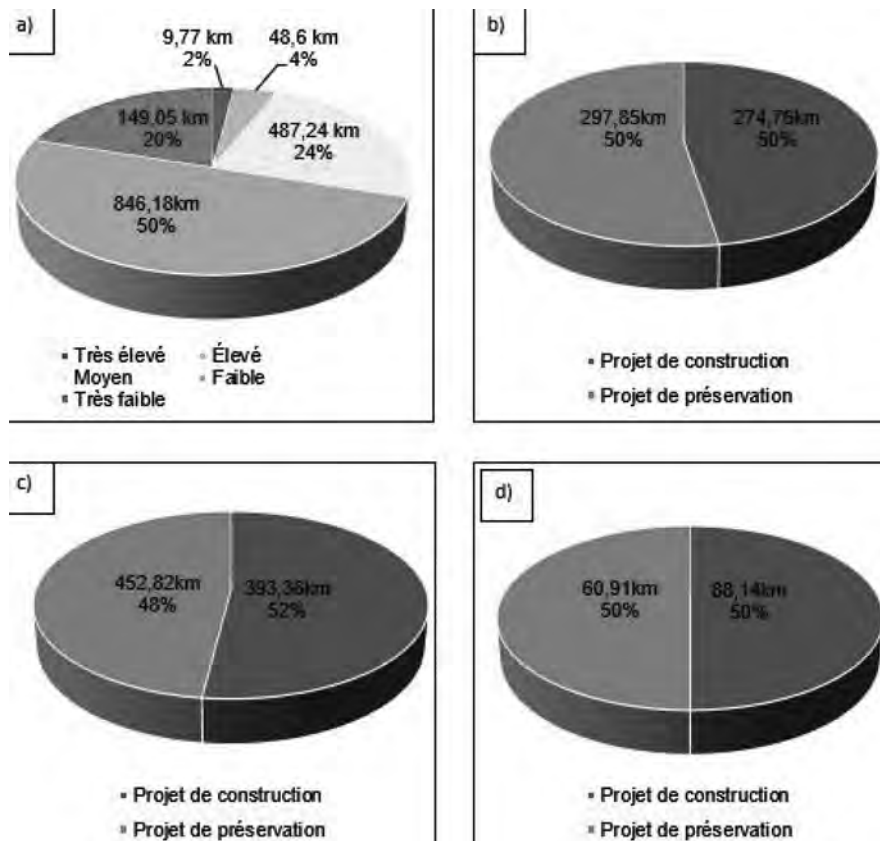


Figure 6 : Indice IPFR des projets : Faible (0-14%)

des longueurs de 274,76 km et 297,85 km (graphique b). Les projets de priorité « faible » comptent pour 52% de projets de construction et 48% de projets de préservation avec des longueurs de 393,36 km et 452,82 km (graphique c) et pour les projets de priorité « très faibles », 50% sont des projets de construction et 50 % des projets de préservation (graphique d). Il est important de préciser que l'IPFR est un outil d'aide à la prise de décision et que son but n'est pas de décider à la place des décideurs. Cependant, les administrations routières des pays en développement et les bailleurs finançant la majorité des projets routiers dans ces pays peuvent faire un tri préliminaire des projets routiers qu'ils considèrent de « haute priorité », dépendamment de leurs politiques et objectifs de financement des projets routiers en se basant sur un outil mathématique fiable qui n'est autre que l'IPFR. Le choix des projets admissibles au financement n'est qu'une phase préliminaire de sélection des projets de « haute priorité » de financement qui feront l'objet d'investigations plus approfondies pour l'analyse technico-économique avec HDM-4. Cette sélection à l'aide de l'IPFR permet de réduire considérablement le temps des évaluations préliminaires des chaussées et d'économiser des montants colossaux nécessaires pour des évaluations détaillées des chaussées. Les résultats de cette approche s'éloignent de l'approche traditionnelle des administrations des pays en développement, qui était de financer prioritairement les projets de construction sans aucune preuve palpable, souvent pour des prestiges politiques, délaissant ainsi les projets de préservation, ou les considèrent comme derniers recours.

Comme présenté dans la figure 8, les dix (10) premiers projets ont été assumés comme étant des projets de « haute priorité ».

Les dix (10) projets ont une longueur totale de 322,63 m dont six (6) projets de préservation d'une longueur de 240,73 km et quatre (4) de construction d'une longueur de 81,9 km. En prenant comme hypothèses que le coût de reclassement d'une route en graveleux latéritique en enduit superficiel bicouche (projet de construction) est de 288 102 \$USD/km et que le coût de préservation des routes en enduit superficiel est d'environ 5 580 \$USD/km, le budget pour la réalisation des projets de hautes priorités est environ de 24 938 827,2 \$USD dont 23 595 553,8 \$USD pour les projets de construction et de 1 343 273,4 \$USD pour les travaux d'interventions préventifs. Les coûts sont issus de la base des données sur les coûts des projets routiers en Afrique de la Banque mondiale (Bank, 2008). Les chaussées ou l'emprise des dix (10) projets routiers de « hautes priorités » sélectionnés feront l'objet ultérieurement d'études de trafic et de géotechnique plus détaillées et d'évaluations fonctionnelles et structurales exhaustives pour la détermination des intrants de conception et de programmation des travaux d'entretien. En effet, les intrants des chaussées non revêtues des projets de construction « haute priorité » seront utilisés dans le dimensionnement des chaussées en vue d'un reclassement en routes revêtues et dans l'analyse économique de cycle de vie pour vérifier si le reclassement est rentable, et aussi pour trouver le moment opportun de reclassement. En ce qui concerne les intrants des projets de préservation, ils serviront à l'établissement d'un programme pluriannuel ou de cycle de vie d'entretien sous contrainte budgétaire. Toutes ces analyses techniques et économiques seront réalisées avec le logiciel de la Banque mondiale HDM-4 comme déjà spécifié ci-dessus et feront probablement l'objet de deux prochains articles.



a) Répartition des projets par niveau de priorité
 b) Répartition des projets de priorité « très élevée à moyenne » par type

c) Répartition des projets de priorité « faible » par type
 d) Répartition des projets de priorité « très faible » par type

Figure 7 : Répartition des projets par niveau de priorité et par type

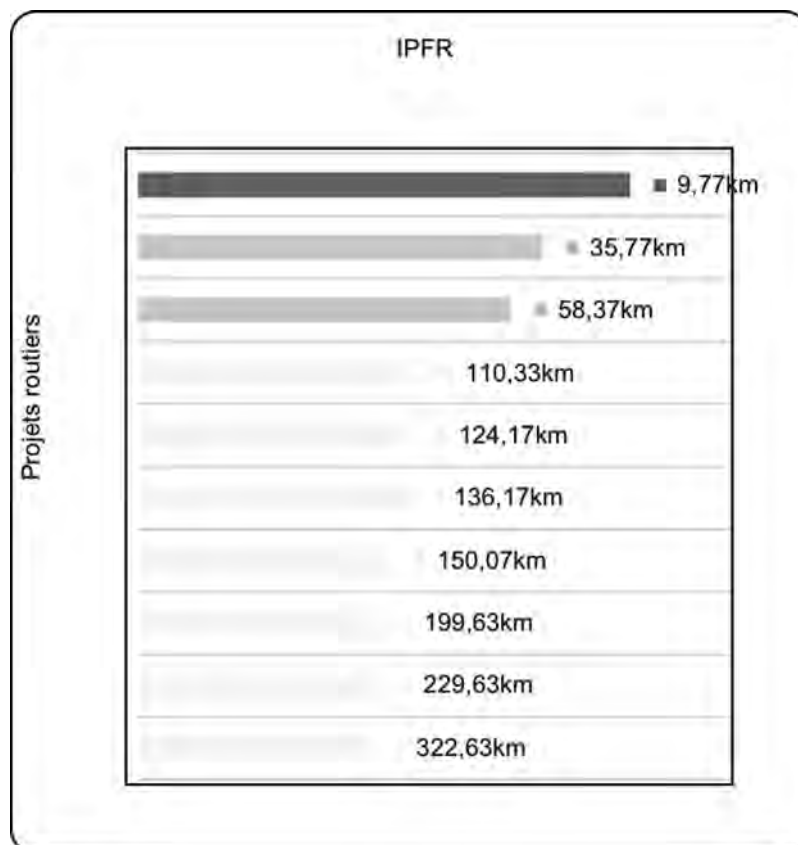


Figure 8 : Projets de « haute priorité »

7. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'évaluation des projets routiers en considérant les aspects techniques, économiques, sociaux, environnementaux est un phénomène multidimensionnel. L'IPFR développé dans cet article est basé sur les étapes de construction des indices composites et utilise l'ACP pour la pondération des indicateurs. L'IPFR, qui est un outil d'aide à la décision, a pour principal but la sélection des projets routiers (construction et préservation) de *haute priorité* d'une administration routière en l'Afrique de l'Ouest. Bien que l'ACP permette de déterminer les poids des indicateurs initiaux indispensables au développement de l'IPFR, les analystes doivent porter une attention particulière aux hypothèses fondamentales requises. L'indice d'adéquation KMO et le test de sphéricité de Barlett ont permis de justifier l'applicabilité de l'ACP et l'interprétation de ces résultats. Les résultats de l'ACP ont prouvé la nature multidimensionnelle du phénomène mesuré : 5 composantes principales expliquant 73,635 % de la variance ont été retenues, bien que le nombre de composantes principales diffère du nombre de dimensions. Le nombre de composantes principales peut être égal au nombre de dimensions, mais ces cas sont très rares, car leurs processus de détermination ou de sélection sont différents. Néanmoins, en fonction des loadings, les composantes 1 et 4 peuvent être qualifiées de techniques, la composante 2 d'environnementale et les composantes 3 et 5 de sociales. Les poids des indicateurs déterminés en se basant sur les indicateurs explicatifs et les contributions à la variance totale des cinq (5) composantes principales ont montré que les scores totaux des indicateurs sont plus influencés par les poids des trafics (TJMA-VL, TJMA-PL), de la population (POP), des coûts d'exploitation des véhicules (CPCVEV) et de la longueur (L), ce qui justifie l'importance des indicateurs de performances techniques et économiques dans la priorisation des projets routiers. Les valeurs des indices de priorité de financement ont permis la sélection des 10 premiers projets comme étant les projets de *haute priorité*, dont les niveaux de priorité varient entre très élevé et moyen. Ces projets routiers dits de *haute priorité* sont composés de 6 projets de préservation (P1, P2, P7, P16, P17, P18) et 4 projets de construction (A5, A10, A11 et A16). Le projet de préservation P1 est le plus prioritaire avec un IPFR de 100.

Les résultats indiquent qu'il est important de préserver les routes, mais aussi de construire de nouvelles routes à condition qu'elles soient justifiées par des IPFR élevés. Le projet de préservation P1 étant le projet le plus prioritaire avec IPFR égal à 100, il est important de mentionner la pertinence de la préservation des routes existantes, qui est l'un des problèmes majeurs chroniques des administrations routières des pays en développement et plus précisément de l'Afrique de l'Ouest. Cet article montre qu'il faut préserver d'abord le patrimoine routier, mais qu'il ne faut pas négliger la construction des routes surtout si elles ont des IPFR élevés. Donc, il y a aussi un grand besoin de construction de nouvelles routes ou de reclassement des routes en terre ou en graveleux latéritiques parce que la densité des routes et la proportion des routes non revêtues en Afrique subsaharienne restent faibles par rapport au reste du monde. En outre, si les bailleurs des fonds et les administrations routières font face à des budgets limités, ce qui est toujours le cas, il est

recommandé d'utiliser l'outil développé dans cet article pour la sélection des tronçons ou projets routiers de *haute priorité* en utilisant les données disponibles et accessibles de l'administration routière concernée avant de poursuivre avec des investigations plus approfondies sur ces tronçons ou projets réduits pour l'obtention des informations plus détaillées. Cette étude ne tenant pas compte de l'analyse de sensibilité et d'incertitude, il est très important de l'effectuer pour déterminer l'intervalle de variation du rang de chaque projet. Cependant, si les différentes parties prenantes parviennent à un consensus des méthodes de sélection, de normalisation et pondération, l'outil développé sera robuste. Les avantages de l'implémentation de l'IPFR seront d'autant plus énormes si les administrations routières ou les gouvernements des pays de l'Afrique de l'Ouest remplacent le cycle chronique de construire-négliger-reconstruire par une vision plus innovatrice, qui est de construire-entretenir-réhabiliter-entretenir. Peut-être qu'en plus des outils d'aide à la décision, l'approche de PDIA (Problem-Driven-Iterative-Approach) devrait être explorée pour permettre de renforcer la capacité de gestion des administrations routières des pays en développement.

RÉFÉRENCES

- [1] AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials. 2012. « Pavement Management Guide Chapter Six : Project and Treatment Selection ». p. 30.
- [2] ADB. 2003. *Integrated environmental and social impact assesment guidelines*. Abidjan, Côte d'Ivoire: African Development Bank, 11 p.
- [3] Amiril, Assa, Abdul Hadi Nawawi, Roshana Takim et Siti Nur Farhana Ab Latif. 2014. « Transportation Infrastructure Project Sustainability Factors and Performance ». *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 153, p. 90-98.
- [4] Antony, G. M., et K. V. Rao. 2007. « A composite index to explain variations in poverty, health, nutritional status and standard of living: use of multivariate statistical methods ». *Public Health*, vol. 121, n° 8, p. 578-87.
- [5] Archondo-Callao, Rodrigo 2004. *Roads economic decision model : Softwareuser and case studies*. Washington, DC: Sub-Saharan Africa Transport Policy Program (SSATP), 118 p.
- [6] BAFD. 2015. *Procédures d'Évaluation Environnementale et Sociale (PEES)*. Abidjan, Côte d'Ivoire: Banque Africaine de Développement, 100 p.
- [7] Bandura, Romina 2008. *A Survey of Composite Indices Measuring Country Performance: 2008 Update*. New York: United Nations Development Programme, 96 p.
- [8] Bank, World. 2008. « Road costs knowledge system (ROCKS) ». < <http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/TOPICS/EXTTRANSPORT/EXTROADSHIGHWAYS/0,,contentMDK:20485235~menuPK:1097394~pagePK:148956~piPK:216618~theSitePK:338661,00.html> >. Consulté le 2018/0.7/25.
- [9] Beria, Paolo, Ila Maltese et Ilaria Mariotti. 2012. « Multicriteria versus Cost Benefit Analysis: a comparative perspective in the assessment of sustainable

- mobility ». *European Transport Research Review*, vol. 4, n° 3, p. 137-152.
- [10] Bhandari, Sahadev Bahadur, Padma Bahadur Shahi et Rabindra Nath Shrestha. 2016. « Ranking rural road projects: weighting different evaluation criteria with a focus on the case of nepal ». *International Journal of Engineering Research and Science & Technology (IJERST)* vol. 5, n° 1, p. 24.
- [11] BOAD. 2015. Étude sur l'entretien routier dans les pays de l'union économique et monétaire Ouest Africaine (UEMOA) : bilan des 50 dernières années et perspectives. Ouagadougou, Burkina Faso: Union Economique et Monetaire Ouest Africaine, 318 p.
- [12] Burningham, Sally, et Natalya Stankevich. 2005. *Why road maintenance is important and how to get it done*. Transport Note No. TRN-4. Washington, DC: THE WORLD BANK, 10 p.
- [13] Cafiso, Salvatore, Alessandro Di Graziano, Henry R Kerali et J. B. Odoki. 2002. « Multicriteria Analysis Method for Pavement Maintenance Management ». *Transportation Research Record 1*, n° 02, p. 12.
- [14] Cattell, Raymond B, et S Vogelmann. 1977. « Comprehensive Trial Of The Scree And Kg Criteria For Determining The Number Of Factors ». *Multivariate Behavioral Research*, vol. 12, n° 3, p. 289-325.
- [15] COST. 2007. *Selection and assessment of individual performance indicators*. United Kingdom: European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research (COST).
- [16] Costello, Anna B, et Jason W Osborne. 2005. « Best Practices in Exploratory Factor Analysis: Four Recommendations for Getting the Most From Your Analysis ». *Practical Assessment, Research and Evaluation*, vol. 10, n° 7, p. 9.
- [17] DFID. 2002. *The Value of Time in Least Developed Countries*. United Kingdom: Department for International Development (DFID), 113 p.
- [18] DFID, Ministère britannique de développement international. 2016. *La préservation des routes nationales comme moteur du développement*. 2016R07FR. Paris: Association mondiale de la Route, 46 p.
- [19] Doukas, Haris, Alexandra Papadopoulou, Nikolaos Savvakis, Theocharis Tsoutsos et John Psarras. 2012. « Assessing energy sustainability of rural communities using Principal Component Analysis ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, n° 4, p. 1949-1957.
- [20] FAD. 2001. *Deuxième programme routier république du Burkina Faso*. Abidjan, Cote d'Ivoire: Fonds Africain de développement, 50 p.
- [21] Farhan, J., et T. Fwa. 2009. « Pavement Maintenance Prioritization Using Analytic Hierarchy Process ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2093, p. 12-24.
- [22] Farhan, Yahya, Ali Anbar, Nisrin Al-Shaikh et Rami Mousa. 2017. « Prioritization of Semi-Arid Agricultural Watershed Using Morphometric and Principal Component Analysis, Remote Sensing, and GIS Techniques, the Zerqa River Watershed, Northern Jordan ». *Agricultural Sciences*, vol. 08, n° 01, p. 113-148.
- [23] Freudenberg, Michael. 2003. « Composite Indicators of Country Performance ».
- [24] Friesen, C. E., P. Seliske et A. Papadopoulos. 2016. « Using Principal Component Analysis to Identify Priority Neighbourhoods for Health Services Delivery by Ranking Socioeconomic Status ». *Online J Public Health Inform*, vol. 8, n° 2, p. e192.
- [25] Fuquan, Pan, Jian John Lu et Qiaojun Xiang. 2008. « Influencing factors for safety level of service and its principal component analysis ». *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, p. 6.
- [26] Gitelman, Victoria, Etti Doveh et Shalom Hakkert. 2010. « Designing a composite indicator for road safety ». *Safety Science*, vol. 48, n° 9, p. 1212-1224.
- [27] Haas, Ralph, Guy Felio, Zoubir Lounis et Lynne Cowe Falls. 2009. « Mesurables performance indicators for road: Measurable Performance Indicators for Roads: canadian and international practice ». In *Best practices in urban transportation planning: measuring change*. (Vancouver, British Columbia), p. 22. Transportation Association of Canada.
- [28] Haas, Ralph, W. R. Hudson et J. P. Zaniewski. 1994a. « Modern Pavement Management ». In., p. 300. Malibar, FL: Krieger Publishing Company.
- [29] Haas, Ralph, W. Ronald Hudson et John Zaniewski (76). 1994b. *Modern Pavement Management* Malabar, Florida: Krieger Publishing Company, 579 p.
- [30] Healy, Leyden K, D Douthwaite, I Lumley, M Gibbons, A Murray, K. Farrell, B Guckian et P Johnston. 2007. *A sustainability assessment process for road-building and other development in Ireland*. Ireland: The foundation for economics sustainability, 71 p.
- [31] Jambu, Michel. 1991. *Exploratory and Multivariate Data Analysis*. San Diego, USA: Academic Press, Inc, 471 p.
- [32] Javed, Farhan. 2011. « Integrated prioritization and optimization approach for pavement management ». Phd. Singapore, National university of singapore, 215 p.
- [33] Kaan, Ozbay, Jawad Dima, A. Parker Neville et Hussain Sajjad. 2004. « Life-Cycle Cost Analysis State of the Practice Versus State of the Art ».
- [34] Keeley, R. J., et R. J. McDonald. 2015. « Part III: Principal component analysis: bridging the gap between strain, sex and drug effects ». *Behav Brain Res*, vol. 288, p. 153-61.
- [35] Kerali, Henry G.R, et J.B Odoki. 2006. *Analytical Framework and Model Descriptions*. United Kingdom: World Road Association (PIARC), 15 p.
- [36] Krishnan, Vijaya 2010. « Constructing an Area-based Socioeconomic Index: A Principal Components Analysis Approach ». In *Early Childhood Intervention Australia*. (Australia), p. 26.
- [37] Kumar, R. Srinivasa (12). 2014. *Pavement evaluation and Maintenance Management system*. India: Universities Press (India) Private Limited, 560 p.
- [38] Lantran, Jean Marie, Jacques Baillon et Jean-Marc Pagès. 1994. *Road Maintenance and the Environment*. Washington, DC: World Bank, 168 p.
- [39] Li, Tao, Hongchao Zhang, Chris Yuan, Zhichao Liu et Chengcheng Fan. 2012. « A PCA-based method for construction of composite sustainability indicators ». *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 17, n° 5, p. 593-603.

- [40] Mainali, Brijesh, et Semida Silveira. 2015. « Using a sustainability index to assess energy technologies for rural electrification ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, p. 1351-1365.
- [41] Malhotra, Naresh (197). 2011. *Marketing research : An applied orientation*, 6. Upper Saddle River, NJ USA: Prentice Hall, Inc, 711 p.
- [42] Marcelo, Darwin, Cledan Mandri-Perrott, Schuyler House et Jordan Schwartz. 2016. *Prioritizing Infrastructure Investment: A Framework for Government Decision Making*. 7674. Washington DC: World Bank Group, 41 p.
- [43] Mata, Teresa M., Nídia S. Caetano, Carlos A. V. Costa, Subhas K. Sikdar et António A. Martins. 2013. « Sustainability analysis of biofuels through the supply chain using indicators ». *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 3, p. 53-60.
- [44] Mazziotta, Matteo, et Adriano Pareto. 2013. « Methods for constructing composite indices : one for all or all for one? ». *Italian Journal of Economics, Demography and Statistics*, vol. 17, n° 1, p. 14.
- [45] MCC. 2007. *Guidelines for Environment and Social Assessment*. Washington, DC: Millennium Challenge Corporation, 19 p.
- [46] OECD. 2008. *Handbook on Constructing Composite Indicators : Methodology and User Guide*. Organization for Economic Cooperation and Development, 162 p.
- [47] Osborne, Jason W, et Anna B Costello. 2004. « Sample size and subject to item ratio in principal components analysis ». *North Carolina State University*, vol. 9, n° 11, p. 9.
- [48] Ouyang, Y., P. Nkedi-Kizza, Q. T. Wu, D. Shinde et C. H. Huang. 2006. « Assessment of seasonal variations in surface water quality ». *Water Res*, vol. 40, n° 20, p. 3800-10.
- [49] PIARC. 2004. *The framework for performance indicators*. Paris, France: World Road Association, 128 p.
- [50] PIARC. 2012. *High level indicators management*. Paris, France: World Road Association, 59 p.
- [51] PIARC. 2013. *Best practices for the sustainable maintenance of rural roads in developing countries*. France: World Road Association, 47 p.
- [52] Pituch, A. Keenan, et P. James Stevens. 2016. *Applied Multivariate Statistics for the Social Sciences*, 6. New York: Routledge, 814 p.
- [53] Saaty, T. L. 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York, NY.
- [54] Saisana, Michaela, et Stefano Tarantola. 2002. *State-of-the-art Report on current methodologies and practices for composite indicator development*. Ispra: Joint Research Center, 72 p.
- [55] Shen, Liyin, Yuzhe Wu et Xiaoling Zhang. 2011. « Key assessment indicators for the sustainability of infrastructure projects ». *American Society of Civil Engineers*, vol. 137, n° 6, p. 11.
- [56] Shrestha, S., et F. Kazama. 2007. « Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin, Japan ». *Environmental Modelling & Software*, vol. 22, n° 4, p. 464-475.
- [57] Tsamboulas, D, G. S Yiotis et K. D Panou. 1999. « Use of multicriteria methods for assessment of transport projects ». *Journal of Transportation Engineering*, vol. 125, n° 5, p. 8.
- [58] USAID. 2014. *Sector environmental guidelines : Rural roads*. Washington, DC: United States Agency for International Development 44 p.
- [59] Wirehn, L., A. Danielsson et T. S. Neset. 2015. « Assessment of composite index methods for agricultural vulnerability to climate change ». *J Environ Manage*, vol. 156, p. 70-80.
- [60] World Bank. 2006. « Road software tools ». < <http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/TOPICS/EXTTRANSPORT/EXTROADSHIGHWAYS> >. Consulté le 25/06.
- [61] World Bank. 2017. *The world bank environmental and social framework*. Washington, DC: International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank, 121 p.
- [62] World Bank Group. 2010. *Cost-benefit analysis in world bank projects*. Washington, D.C.: World Bank, 82 p.