

Intégration de la cause de détérioration des routes en Afrique subsaharienne

Bienvenu Thierry MBOG TOWADA* et Gabriel J. ASSAF

*Département de Génie de la Construction, Université du Québec, École de Technologie Supérieure,
1100, Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3*

* Correspondance, courriel : thierrymbog@yahoo.fr

Résumé

Cet article développe une approche simple permettant d'identifier la cause de détérioration des chaussées flexibles en Afrique subsaharienne dans le but d'aider les ingénieurs à choisir les interventions les plus appropriées. Cette approche permet d'associer à chaque défaut de surface l'ensemble des causes possibles, de choisir les essais de confirmation pertinents et les interventions appropriées. Le choix du type de réhabilitation à effectuer tiendra alors compte de la solution optimale tout en respectant des niveaux de qualité acceptable au point de vue technique, environnemental et sociétal. Afin d'illustrer l'approche proposée, une étude au nord du Sénégal est effectuée. Cette étude vise à comparer l'option d'intervention retenue par l'ingénieur-conseil selon un dimensionnement structural conventionnel sur un tronçon de près de 120 km de la route RN2 au Sénégal à l'approche proposée dans cet article. L'approche proposée repose sur l'évaluation de la cause de détérioration, la confirmation de celle-ci par des vérifications d'essais, suivie d'une analyse des courbes de détérioration avec l'outil HDM-4 de l'AIPCR (Association Mondiale des routes) en support pour le choix de la solution optimale.

Mots-clés : *chaussée, détérioration, cause, réhabilitation, Afrique subsaharienne.*

Abstract

Integration of the cause of deterioration of roads in sub-Saharan Africa

This paper presents a simple approach to identify the cause of deterioration of flexible pavements in Sub-Saharan Africa (SSA) in order to help engineers select the most appropriate interventions. This approach associates each distress to potential causes, in order to select relevant tests so that the cause may be confirmed and then appropriate interventions representing the cheapest long-term solution while meeting acceptable levels from a technical, environmental and societal point of views. A 120 km highway section in the north of Senegal was analysed with the proposed approach. This study compares the intervention option chosen by the consulting engineer according a conventional structural design with the approach proposed in this paper. The proposed approach is based on the assessment of the cause of deterioration, and the confirmation of the cause with tests, followed by the HDM-4 flexible pavement deterioration models of PIARC (World Road Association) to support the choice of the optimal solution.

Keywords : *pavement, deterioration, Cause, rehabilitation, sub-Saharan Africa.*

1. Introduction

1-1. Problématique

Étant donné que la plupart des routes en Afrique subsaharienne sont bosselées, ravinées, mal entretenues, la Banque Mondiale principal bailleur de fonds dans le secteur estimait qu'il faudrait investir 5 milliard de dollars chaque année pendant au moins dix ans pour les réhabiliter [1]. Elle veut depuis des années coordonner la recherche de la conception des routes et établir les normes d'entretien et de réhabilitation en vue de comparer des projets d'investissement des routes dans les différents pays. C'est pour cette raison que cet article propose une approche logique qui repose sur la prémisse que la meilleure intervention doit être celle qui répond et traite la cause de détérioration au moindre coût possible à long terme [2]. Cet article fait d'abord ressortir l'état de l'art dans lequel il sera question d'une revue de la littérature et de l'état des routes en Afrique subsaharienne. Dans un deuxième temps, il présente une approche simple en pointant les causes de détérioration des chaussées dans ces pays ainsi que les tableaux des différentes dégradations et les causes couramment rencontrées sur ces chaussées. Enfin il présente une validation de l'approche sur un tronçon de près de 120 km de la route RN2 au Sénégal.

1-2. État de l'art

1-2-1. Revue de la littérature

Le développement économique d'une nation passe entre autres par l'état de ses routes. L'entité responsable de la gestion de celles-ci se doit de mettre en œuvre des programmes qui assurent la pérennité des infrastructures afin qu'elles demeurent profitables à la société [3]. Ces programmes reposent sur la connaissance de l'état des sections du réseau, le diagnostic des causes de détériorations relevées et la prédiction de l'évolution de chacun des tronçons dans le but de prioriser les interventions [4]. En passant en revue la littérature dans le domaine de l'évaluation des chaussées flexibles, on constate rapidement que les ouvrages de référence tel que Robert Tessier [5] portent surtout vers trois secteurs qui sont : le relevé des dégradations, l'évaluation de la capacité portante et l'analyse de la durée de vie d'une structure. Une approche louable pour l'époque puisqu'elle repose sur les mêmes principes qui régissent la conception d'une structure flexible au niveau projet [6]. Les revues spécialisées qui traitent des sujets qui touchent de près ou de loin au diagnostic de la causes de détérioration des chaussées flexibles, des essais réalisables et leur potentiel de vérification sont très rares à l'exception de l'OCDE [7], du SHRP [8], des travaux de [2], du MTQ [9] et des travaux de [4]. Les recherches approfondies pour mieux gérer les chaussées flexibles démontrent qu'au 21^e siècle, le développement de logiciels utiles et pragmatiques représente la solution préconisée pour rentabiliser le budget d'entretien d'un réseau entier [10]. Objectivement, il est tout à fait impossible d'optimiser la rentabilité des sommes nécessaires à la correction des défauts sur l'ensemble d'un réseau routier sans avoir recours à un système de gestion des chaussées (SGC) [11]. Les innombrables possibilités engendrées par la diversité des caractéristiques de chacun des tronçons, ainsi que le nombre toujours grandissant d'options d'entretien réalisables, demandent une approche systémique pour en assurer l'analyse complète car l'étendue des possibilités offertes par les systèmes est impressionnante [12]. Force est toutefois d'admettre que les modèles doivent être calibrés [13] pour bien refléter la réalité des mécanismes de détérioration issus du climat par exemple dans un contexte québécois [14]. Les essais à réaliser pour confirmer la présence d'une cause relèvent d'un procédé d'évaluation qualitative, quantitative ou typologique des caractéristiques et des propriétés physico-chimiques des matériaux [15]. D'après [2, 6], les symptômes ou défauts sont intimement liés aux causes qui engendrent les mécanismes de détérioration grâce aux agents comme le trafic.

L'apparition de défauts à la surface d'un tronçon est due à la présence de certains agents qui agissent sur la structure de la chaussée. Cet état engendre les causes qui déclenchent le mécanisme de détérioration produisant ainsi la dégradation de surface initialement relevée [16]. L'action d'une cause permet d'affirmer la présence du mécanisme responsable de l'éruption des défauts [6]. Malgré l'exécution d'essais spécifiques à l'affirmation des causes, la diversité des résultats est accentuée en raison du caractère spécifique d'une structure flexible et des changements internes en cours [13]. En effet, l'imprécision des résultats accroît l'incertitude de l'analyse cognitive et provoque le doute sur la fiabilité du diagnostic rendu [17]. Pour y remédier, il est primordial de contrevérifier l'affirmation de la cause par l'identification du lien de causalité entre les causes présentes et les défauts originellement ciblés par l'analyse [6]. Alors, le procédé systémique doit comprendre: l'observation des défauts, l'analyse permettant de cibler les causes possibles, l'affirmation de la présence de chaque cause par la réalisation d'essais ainsi que la validation de ces dernières auprès des défauts qui ont conduit à leur réalisation en laboratoire ou sur site [2]. Enfin, le regroupement des causes par famille entraîne une importante réduction du nombre de liens inductifs qui ciblent, affirment et valident les causes de détérioration à travers un projet [2]. D'après la littérature, les études sur l'intégration de la cause de détérioration des routes a fait son chemin dans les pays développés mais reste encore absente dans les pays d'Afrique Subsaharienne [15]. D'où l'importance dans cet article de proposer une intégration de la cause de détérioration des routes dans ces pays d'Afrique Subsaharienne afin d'aider les ingénieurs à choisir les interventions appropriées.

1-2-2. État actuel des routes des pays d'Afrique subsaharienne

Le système routier des pays en Afrique subsaharienne est principalement composé de routes à faible débit. Ce type de route représente plus de 75 % du réseau routier [18]. De façon générale les routes peuvent être réparties en quatre catégories : routes nationales, routes principales, routes secondaires et routes de desserte. Le choix des caractéristiques de ces routes est généralement fonction de la circulation [19].

- Routes nationales: généralement plus de 5 000 véhicules par jour.
- Routes principales : de 100 à 5 000 véhicules par jour.
- Routes secondaires : de 50 à 800 véhicules par jour.
- Route de desserte : moins de 100 véhicules par jour.

Alors que les chaussées flexibles représentent un actif important qu'il faut préserver, force est d'admettre que l'absence d'entretien demeure le principal ennemi de la durée de vie de ces chaussées. L'évolution des dégradations de surface se fait alors suivant un processus accéléré dès lors qu'on atteint un certain niveau de détérioration par suite de l'action généralement conjuguée de l'eau, qui fait chuter la portance des couches constitutives. Ceci est d'autant plus grave que les charges lourdes qui s'exercent sur ces chaussées sont extrêmement élevées puisqu'elles ne répondent pas toujours aux standards de [20, 21] qui recommandent de limiter les charges sur essieux.

1-2-3. État futur des routes dégradées des pays d'Afrique subsaharienne

Si l'adaptation économique des modèles des pays développés aux besoins du développement des pays émergents est une nécessité, l'adaptation des techniques en est tout autant. En effet, les ingénieurs ont à rechercher comment ils peuvent adapter et utiliser au mieux les éléments qu'ils ont à leur disposition. Les analyses des données de dégradation des chaussées routières dans les pays d'Afrique subsaharienne ont fait ressortir de graves endommagements, précoces et coûteux pour l'administration et les usagers [22]. Ces observations ont révélé les limites des outils utilisés pour le dimensionnement structural des chaussées et la compréhension du comportement rhéologique des matériaux utilisés.

Aujourd'hui, vu le prix très variable du pétrole, les défis économiques, les enjeux environnementaux et l'épuisement des gisements naturels de granulats, il devient important pour les pays d'Afrique subsaharienne de recourir au revêtement en béton qui peut être produit avec des granulats de moindre qualité [23]. En ce qui concerne cette technique du revêtement en béton, l'introduction de la dalle de béton a contribué à l'amélioration des capacités portantes des structures de chaussées [24]. Pour une même épaisseur de revêtement, les travaux de Shackel cités par [25] ont révélé que la couche en béton (cas des pavés) présente une résistance largement supérieure par rapport à celle de l'enrobé bitumineux. De nombreux documents dont le guide technique des chaussées rigides du LCPC [23] et le Pavement Analysis and Design [24] présentent les avantages indéniables des chaussées en béton pour soutenir les poids lourds. Ceci est d'autant plus utile qu'en Afrique subsaharienne l'essieu de référence est de 13 tonnes au lieu de 8 tonnes comme en Amérique du Nord et que les surcharges atteignant 15 voire 20 tonnes par essieu sont courantes tel qu'au Sénégal [15].

2. Méthodologie

Tableau 1 : Défauts de fissuration

SYMPTÔME	DESCRIPTION	MÉCANISMES DE DÉTÉRIORATION POSSIBLE
Fissure en mailles	Fissures en forme de peau de crocodile formant une série de petits polygones.	<ul style="list-style-type: none"> - mouvement thermique de retrait du mélange, - mouvement hydraulique de retrait des couches stabilisées, - Rupture par fatigue du mélange bitumineux, - Oxydation et vieillissement naturel du bitume, - Surchauffage du bitume lors de l'épandage.
Fissure rectiligne	Fissure simple longitudinale dans le sens du trafic.	<ul style="list-style-type: none"> - retrait thermique des couches inférieures, - mauvaise construction du joint longitudinal.
Fissure dans les traces de roues	Fissure simple ou polygonale accompagnée d'ornièrè dans les traces de roues.	<ul style="list-style-type: none"> - rupture par fatigue du mélange bitumineux, - retrait thermique des couches inférieures, - mauvaise construction du joint longitudinal.
Fissures en rives	Fissure simple ou polygonale en bordure.	<ul style="list-style-type: none"> - infiltration d'eau par les côtés, - mouvement vertical des couches mal compactées, - tassement causé par un glissement de terrain, - instabilité latérale en rive et largeur étroite, - mauvais fonctionnement du système de drainage.
Fissure transversale	Fissure simple ou polygonale perpendiculaire au sens du trafic.	<ul style="list-style-type: none"> - mouvement thermique de retrait du mélange, - mouvement hydraulique de retrait des couches stabilisées. - retrait thermique des couches inférieures.

Tableau 2 : Défauts touchant à la sécurité

SYMPTÔME	DESCRIPTION	MÉCANISMES DE DÉTÉRIORATION POSSIBLE
Présence d'eau en surface	Présence d'eau stagnante sur la chaussée trop longtemps après une pluie.	<ul style="list-style-type: none"> - succion de l'eau du sol vers la structure, - infiltration d'eau à travers les fissures, - infiltration d'eau par les côtés, - mauvais fonctionnement du système de drainage, - devers insuffisants, dénivellations.
Ressuage	Remontée localisée de liant à la surface de la chaussée donnant un aspect noir et brillant.	<ul style="list-style-type: none"> - bitume trop mou, - surdosage en bitume.
Glaçage	Usure de la couche de roulement par arasement progressif des gravillons au niveau du mastic fines-bitume, sans arrachement de ceux-ci.	<ul style="list-style-type: none"> - Granulats trop polissables. - Usure du revêtement.

Tableau 3 : Défauts de cohésion de surface

SYMPTÔME	DESCRIPTION	MÉCANISMES DE DÉTÉRIORATION POSSIBLE
Désintégration et trou	Perte progressive de matériaux de la chaussée. Désenrobage ou séparation du bitume en présence d'eau.	<ul style="list-style-type: none"> - succion de l'eau du sol vers la structure, - infiltration de l'eau à travers les fissures, - infiltration de l'eau par les côtés, - couche latéritique comprenant trop de fins, - rupture par fatigue du mélange bitumineux, - oxydation et vieillissement naturel du bitume, - dosage déficient en bitume, - surchauffage du bitume lors de l'épandage, - séparation du bitume et des granulats par l'eau.
Pelade	Arrachement par plaques de mélange bitumineux.	<ul style="list-style-type: none"> - épaisseur insuffisante de la couche d'usure, - manque d'adhérence à l'interface.

Tableau 4 : Défauts de déformation

SYMPTÔME	DESCRIPTION	MÉCANISMES DE DÉTÉRIORATION POSSIBLE
Affaissement	Abaissement ou enfoncement localisé du niveau de la chaussée pouvant créer des dénivelés importants et brutaux.	<ul style="list-style-type: none"> - succion de l'eau du sol vers la structure, - infiltration de l'eau à travers les fissures, - infiltration de l'eau par les côtés, - couche latéritique comprenant trop de fins, - mouvement vertical des couches mal compactées, - rupture d'une canalisation souterraine, - tassement causé par un glissement de terrain, - instabilité latérale en rive et largeur étroite.
Ornière	Dépression dans les traces.	<ul style="list-style-type: none"> - couche latéritique comprenant trop de fins, - mouvement vertical des couches mal compactées, - granulats du mélange trop arrondis (peu anguleux), - usure du mélange, - bitume trop mou en été, - dosage déficient en bitume, - surdosage en bitume.
Soulèvement	Soulèvement très localisé de la chaussée.	<ul style="list-style-type: none"> - succion de l'eau du sol vers la structure, - infiltration de l'eau à travers les fissures, - infiltration de l'eau à travers les côtés, - gonflement à l'eau d'une latérite argileuse, - rupture d'une canalisation souterraine.
Ondulation	Vagues ou succession de vagues, transversales, régulières et rapprochées.	<ul style="list-style-type: none"> - freinages fréquents, - mauvaise mise en œuvre du mélange bitumineux, - surdosage en bitume, - bitume trop mou, - inadhérence à l'interface.

En général, avant de mettre sur pied une méthodologie pour le choix de l'intervention des chaussées en Afrique subsaharienne, il convient dans un premier temps de ressortir les causes de dégradations couramment rencontrées sur ces chaussées. Ces dégradations et leurs causes sont illustrées dans les **Tableaux 1 à 4** qui ont été créés à partir du manuel de Conception Routier pour l'Évaluation des Techniques d'Entretien (CRETE) [26] et du manuel du Ministère des transports du Québec (MTQ) [27].

Tel que montré dans les **Tableaux** précédent, les dégradations couramment rencontrées en Afrique subsaharienne sont souvent dues en grande partie à l'eau laquelle ne s'évacue pas facilement du corps de la chaussée. Ceci est dû au fait que les matériaux utilisés renferment généralement beaucoup de matériaux fins. En effet, il est courant que des teneurs en matériaux fins se situant entre 5 % à 15 % voire beaucoup plus, soient observées comparativement au Canada où la norme de matériaux fins est généralement de l'ordre de 7 %. Le **Tableau 5** nous donne le pourcentage des matériaux fins recommandé en Afrique subsaharienne selon [28].

Tableau 5 : Pourcentage de particules fines autorisées en fondation supérieure

Tamis (mm)	Pourcentage total en masse de passage au tamis.		
	Taille maximale de particules nominale		
	37,5 mm	20 mm	10 mm
50	100	-	-
37,7	80-100	100	-
20	60-80	80-100	100
10	45-65	55-80	80-100
5	30-50	40-60	50-70
2,36	20-40	30-50	35-50
0,425	10-25	12-27	12-30
0,075	5-15	5-15	5-15

L'eau joue un rôle important dans l'affaiblissement de la portance des couches qu'elle imbibe. Elle peut s'infiltrer à travers un revêtement fissuré ou à travers des accotements non revêtus. Elle peut aussi remonter des couches profondes de la plateforme par capillarité. Cet accroissement du taux d'humidité est d'autant plus grave que le revêtement gêne l'évaporation. Il convient donc au moment de la construction, de choisir impérativement les matériaux de fondation en fonction de leur capacité à drainer et de leur faible susceptibilité à l'eau. Il faut également rendre les revêtements étanches et écarter l'eau stagnante des abords de la chaussée. Lors d'une étude de réhabilitation, il est alors essentiel de bien caractériser les propriétés des différentes couches de la chaussée dégradée à traiter, de définir la cause de dégradation observée et de dimensionner une réhabilitation économiquement optimale à long terme. Dans le cas d'une gestion préventive, il faut définir les zones à traiter dès la manifestation des premiers défauts par l'application des solutions d'entretien périodique à moindre coût telles que le tapis mince lequel va redonner à la chaussée sa souplesse et un bel uni. Pour réhabiliter une chaussée en assurant son confort au roulement (un bon IRI) tout au long du cycle de vie de la route, il faut identifier la cause de détérioration et trouver les solutions appropriées. Cette méthodologie s'articule comme suit :

- Évaluer parmi la liste des défauts présentée aux **Tableaux 1, 2, 3 et 4**, les défauts de la route à réhabiliter et sectionner la route en zones homogènes de trafic, topographie, état de la route et profil en travers type.
- Identifier la cause de détérioration la plus probable qui revient le plus fréquemment à partir des **Tableaux 1, 2, 3 et 4**.
- Confirmer la cause de détérioration par des vérifications d'essais appropriés qui s'imposent afin de confirmer la cause tel que :
 - caractérisation de la formule du bitume (% bitume, % de filler, résistance à la déformation, pénétration résiduelle, angularité des granulats);

- remontée des fissures sur carottes d'un ancien revêtement;
- qualité du drainage;
- test d'arrachement sur l'enrobée de surface;
- essai de portance déflectomètre à boulet ou à la poutre benkelman;
- accotements non revêtus permettant l'infiltration d'eau.
- Dégager les interventions qui seront retenues après avoir confirmé la cause de détérioration par des vérifications d'essais, suivie d'une analyse des courbes de détérioration avec l'outil HDM-4 de l'AIPCR (Association Mondiale des routes) en support pour le choix de la solution optimale c'est-à-dire, la solution qui traite la cause de détérioration et qui assure tout au long de la durée de vie de la route un très grand confort au roulement (un bon IRI).

Le **Schéma** ci-dessous représente les étapes d'une étude de réhabilitation d'une chaussée flexible en Afrique Subsaharienne en mettant l'accent sur l'identification de la cause de détérioration afin de choisir l'intervention la plus appropriée.

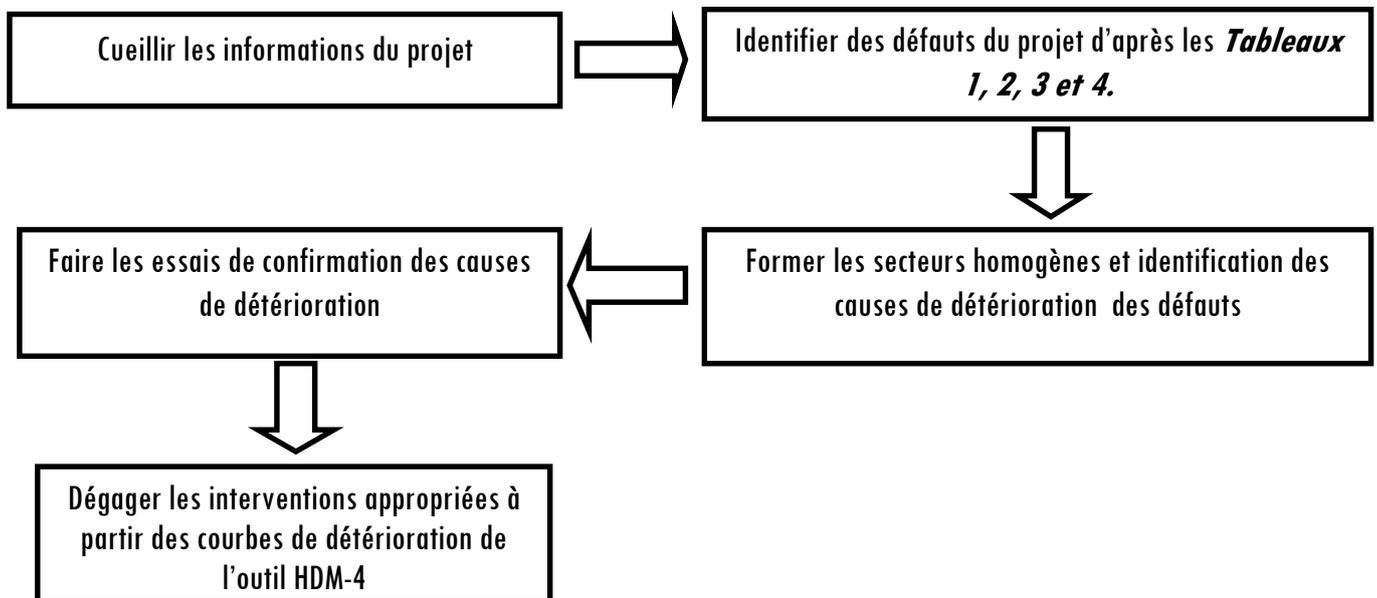


Schéma 1 : Étapes d'une étude de réhabilitation

3. Résultats et discussion

3-1. Étude au Nord du Sénégal

3-1-1. Données du projet

Dans le cadre de la mise en œuvre d'un nouveau programme d'aide aux pays émergents qui répondent à certains critères [29], le gouvernement des États-Unis d'Amérique a créé le Millennium Challenge Corporation (MCC), le 23 janvier 2004. La mission du MCC consiste à réduire la pauvreté en appuyant la croissance économique durable et transformative dans les pays en voie de développement.

Le 16 septembre 2009, le MCC et le gouvernement du Sénégal ont signé un accord de subvention de cinq (5) ans d'un montant de 540 millions de dollars US, pour financer un programme conçu pour réduire la pauvreté à travers des interventions ciblées portant sur l'agriculture, le transport et les infrastructures sociales. C'est ainsi que pour l'exécution de ce Compact, le Millennium Challenge Account - Sénégal (MCA-Sénégal) a été créé pour mettre en œuvre les travaux de réhabilitation de la route RN2 entre les villes de Richard Toll et de N'Dioum d'un linéaire de près de 120 km. Les principaux acteurs de ce projet sont :

- Le Millennium Challenge Account — Sénégal (MCA-Sénégal) à titre de Maître d'Ouvrage.
- L'Agence des Travaux et de Gestion des Routes (AGEROUTE) à titre d'Assistant technique du Maître d'Ouvrage.
- Le Bureau d'Études qui a fait les études d'ingénierie.
- L'entreprise qui a exécuté les travaux.
- Le MCC qui a financé l'opération par un don.

3-1-2. Option retenue pour l'appel d'offres par le bureau d'études

L'option proposée par le bureau d'études est l'option 1. Elle consiste à un élargissement de la chaussée existante par un décaissement de 40 cm de matériaux puis un apport de 15 cm de nouveaux matériaux de caractéristique d'une couche de fondation, la mise en œuvre d'une couche de base de 20 cm de latérite-ciment sur la largeur de la plateforme et la mise en œuvre d'un revêtement en béton bitumineux de 5 cm. Dans cette option, le bureau d'études a utilisé la méthode CEBTP [30] combinaison des indices de qualités avec le trafic pour déterminer une structure de renforcement. Les vérifications ont été faites par le logiciel Alizé [31] pour s'assurer que les contraintes ainsi que les déformations enregistrées sont inférieures aux limites admissibles. Un entretien périodique est prévu au moins tous les 10 ans dépendamment de la dégradation de la chaussée.

3-1-3. Option résultant de l'application de l'approche proposée dans cet article

Dans cet article trois options ont été proposées en dehors de l'option de base (option de non intervention majeure) pour l'application de l'approche proposée à savoir l'option 2, 3 et 4. Rappelons que l'option 1 est celle du bureau d'études laquelle fut détaillée à la section 4.1.2. En ce qui concerne l'option de base, elle consiste à faire un entretien courant durant toute la durée de vie de la chaussée en réalisant les réparations mineures telles que la réparation des rives, le scellement des fissures et le rapiéçage des nids de poules sur la chaussée. L'option 2 quant à elle consiste à pulvériser sur une épaisseur de l'ordre de 35 cm, valoriser les matériaux retirés sur la route avec un ajout de 2,5 % à 3 % de ciment sur 30 cm avec ou sans correction granulométrique pour réduire la teneur des fines au besoin par l'apport de la pierre nette. Ceci aura pour conséquence de stabiliser 30 cm de couche de base afin d'augmenter la résistance structurale de la route. Le CBR amélioré à 95 % OPM doit être supérieur ou égal à 160 pour la couche de base et le module entre 1000 et 2000 Mpa max [32]. Un nouveau revêtement de 5 cm de béton bitumineux est posé à la fin. Un entretien périodique est effectué tous les 10 ans dès l'apparition de dégradation sur la surface de la chaussée. L'option 3 consiste à maintenir la structure existante comme fondation, puis de mettre une couche de 20 cm de béton de ciment (dalles courtes goujonnées) comme revêtement. Selon [33] du centre de recherche routière en Belgique, cette opération peut jusqu'à tripler la durée de vie de la route à cause des lois de comportement de béton et son entretien sera réduit selon les observations rapportées. Enfin l'option 4, consiste à enlever 5 cm d'enrobés au maximum, le recycler, le rajeunir et le remettre sur une autre route de classe secondaire. Il s'agira sur la route principale de réparer les trous, de corriger le profil et de faire un rechargement d'enrobé neuf de 5 cm. Un entretien périodique qui va consister à procéder au renouvellement du revêtement en béton bitumineux selon une épaisseur qui dépendra du trafic ou tous les 10 ans dès l'apparition de dégradations prononcées sur la surface de la chaussée.

3-1-4. Méthode utilisé pour l'étude

Pour réaliser cette étude sur la RN2, nous avons utilisé le logiciel HDM-4 [34] dans le but d'étudier les variantes de réhabilitation les plus économiques et environnementalement saines pour la société en général et les usagers routiers en particulier. Pour justifier le choix de la méthodologie de réhabilitation des chaussées, une comparaison a été effectuée entre diverses options retenues pour ce projet de réhabilitation à l'option de base (option de non intervention majeure) et à l'option 1 (option retenue initialement par le bureau d'études).

3-1-5. Données d'identification du projet avant la réhabilitation

Le **Tableau 6** ci-dessous fournit les données d'identification du projet avant la réhabilitation, à savoir par exemple que la longueur est de 120 km, la largeur est de 4 à 6 m, le nombre de voies est de 2 et l'IRI moyen est de 2,9 m/km. Cette IRI a été mesuré avec un analyseur du profil en long (APL) et étalonné par huit sections de 200 m à la mire et au niveau. L'exactitude et la répétabilité sur l'APL sont de moins de 10 %.

Tableau 6 : Données d'identification du projet avant la réhabilitation

Identification du projet	RN2
Longueur du projet	120 km
Largeur de la chaussée sur tout le projet	4 à 6 m
Nombre de voies	2,00
Nombre de trottoirs	2 x 1,00 m
TJMA (2009), véhicules par jour	876
Sens du trafic	2 sens
Vitesse limite	80 km/h
Climat de type sahélien	9 à 10 mois (octobre-Juillet) saison sèche
	2 à 3 mois (fin Juillet-Début octobre) saison pluvieuse
Pluviométrie moyenne annuelle	265 mm
Pluviométrie maximale journalière	47 mm
IRI moyen	2,9 m/km
	Fondation : 400 mm
Épaisseur des couches de la chaussée existante	Base : 200 mm
	Revêtement : 50 mm
Capacité de portance du sol, CBR	Sol de plateforme : CBR 21%

3-1-6. Données d'identification du projet après la réhabilitation

Le **Tableau 7**, fournit quelques données du projet après la réhabilitation, par exemple que la largeur moyenne en section courante est de 7,20 m et celle en agglomération est de 11 m et l'IRI moyen est de 1,5 m/km. L'IRI a été mesuré avec un analyseur du profil en long (APL) et étalonné par huit sections de 200m à la mire et au niveau. L'exactitude et la répétabilité sur l'APL sont de moins de 10 %.

Tableau 7 : Données d'identification du projet après la réhabilitation

Caractéristique de la nouvelle route à aménager et à réhabiliter	RN2
Vitesse de référence	80 km/h et (60 km/h en agglomération)
Pente minimale des talus en remblais	3/2 (3 horizontale, 2 verticale)
Pente minimale des talus en déblais	1/2 (1 horizontale, 2 verticale)
Charge maximale à l'essieu	13t (tonnes)
Mise hors d'eau	obligatoire
Largeur de la chaussée en section courante et en agglomération	2 x 3,60 m = 7,20 m
Largeur des accotements	Section courante : 2 x 1,50 m = 3 m En agglomération : 2 x 2,00 m = 4 m
Largeur de la chaussée dans l'agglomération de N'Dioum	4 x 2,75 m = 11 m
Largeur des accotements dans l'agglomération de N'Dioum	2 x 1,75 m = 3,5 m
IRI post-travaux	1,5 m/km
Longueur de la chaussée	Section courante : 110,5 km En agglomération : 6,45 km
Longueur de la chaussée dans l'agglomération de N'Dioum	3,05 km
Taux de croissance	Trafic normal : 3,5% - 4,55% Trafic induit : 30% (15% grâce au projet routier RN2 et 15% grâce à d'autres projets dans la zone du projet.
Période d'analyse du projet	20 ans
Durée des travaux de réhabilitation du projet	24 mois
Date du début des travaux de réhabilitation du projet	13 janvier 2013
Date de mise en œuvre du projet	13 janvier 2015

3-1-7. Les paramètres de l'analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité a été réalisée pour examiner la robustesse des conclusions de l'étude: le coût d'investissement des travaux, la croissance du trafic normal des véhicules et le trafic moyen journalier annuel (TMJA) post-travaux. Pour le choix des paramètres, la méthode utilisée a été la méthode essai-erreur qui est caractérisée par des essais divers qui sont continués jusqu'au succès de la recherche. Les scénarios examinés ici font varier les paramètres suivants, pris individuellement :

- Coûts d'investissement des travaux (+/- 25 %)
- Croissance du trafic normal (+/- 70 %)
- TMJA du trafic normal post-travaux (+/- 25 %)

3-1-8. Les différentes dégradations du projet de la RN2

En accord avec la méthodologie proposée dans cet article à la section 2, notre projet a été divisé en 11 sections dépendamment des dégradations et des profils en travers types de chaque section. Le **Tableau 8** tabule les différentes sections, leurs dégradations ainsi que leurs profils en travers type.

Tableau 8 : Les différentes sections de la route, leurs dégradations et leurs profils en travers type

PKi	PKf	Profil en travers type	section	Dégradations
0+000	29+350	PT1	1	Bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages fins à mailles larges sans arrachements, faïençages, fissures transversales, âge (plumage ponctuel), épaufrures de rive.
29+350	30+550	PT2	2	Affaissement, fissures longitudinales, faïençages, pelade, âge (plumage ponctuel), épaufrures de rive, fissures transversales, désenrobage, peignage, plumage.
30+550	48+750	PT1	3	Orniérage, bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, désenrobage, pelade, plumage, ressuage, épaufrures de rives.
48+750	50+200	PT2	4	Orniérage, bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, désenrobage, pelade, plumage, ressuage, épaufrures de rives.

50+200	62+550	PT1	5	Orniérage, bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, désenrobage, pelade, plumage, ressuage, épaufrures de rives.
62+550	64+750	PT2	6	Bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, pelade, plumage, ressuage, épaufrures de rives.
64+750	89+050	PT1	7	Bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, pelade, plumage, ressuage, épaufrures de rives.
89+050	90+650	PT2	8	Bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, pelade, plumage, ressuage, épaufrures de rives.
90+650	111+700	PT1	9	Affaissement, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, désenrobage, pelade, plumage, ressuage, épaufrures de rives.
111+700	114+750	PT3	10	Affaissement, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, désenrobage, pelade, plumage, ressuage, épaufrures de rives.
114+750	120+000	PT1	11	Affaissement, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, désenrobage, pelade, plumage, ressuage, épaufrures de rives.

Les profils en travers types PT1, PT2 et PT3 correspondent aux cas ci-après :

- ✓ PT1 : Profil en travers à deux voies en rase campagne (chaussée : 2 x 3,60 m et accotements : 2 x 1,50 m) ;
- ✓ PT2 : Profil en travers à deux voies en agglomération (chaussée : 2 x 3,60 m et accotements : 2 x 2,00 m) ;
- ✓ PT3 : Profil en travers en 4 voies en agglomération (Chaussée : 4 x 2,75 m et accotements : 2 x 1,75 m).

Concernant les causes de détérioration qu'il est nécessaire d'établir conformément à la section 3, celles-ci sont dues en grande partie à l'eau qui s'infiltré à travers le revêtement ou les accotements dont l'étanchéité est défaillante et remonte dans les couches profondes de la plate-forme par capillarité et à l'érosion causée par l'eau de pluie mal drainée en pluie hivernale (période de pluie en Afrique subsaharienne).

3-1-9. Les hypothèses prises en compte lors de notre simulation sur HDM-4

Un appel d'offres pour effectuer les travaux selon l'option 1 proposée par le bureau d'étude a permis de sélectionner un entrepreneur général. Les niveaux de prix pratiqués au Sénégal et spécifiquement dans la zone du projet ont également permis au consultant d'arrêter les prix unitaires qui seront utilisés dans le cadre de l'estimation des travaux. Les coûts de la réhabilitation proposée ont été estimés à partir des quantités de l'avant métré détaillé des travaux sortis du logiciel de conception du projet (Piste) et des plans présentés dans le dossier des pièces graphiques du dossier d'appel d'offres (APD). Les différents aménagements des autres options retenues dans cet article ont été évalués d'abord quantitativement, ensuite nous avons appliqué les prix unitaire de l'entrepreneur retenu pour le projet y compris pour le béton pour aboutir à un coût global pour l'aménagement de chaque option.

- ✓ Option 1 (option du bureau d'étude) : le prix du km de route est de 601 682 \$
- ✓ Option 2 (option de pulvo-stabilisation/correction granulométrique et resurfage) : le prix du km de route est de 592 170 \$
- ✓ Option 3 (option béton de ciment) : le prix du km de route est de 718 952 \$
- ✓ Option 4 (option surfage direct) : le prix du km de route est de 464 446 \$

3-2. Résultats de l'étude au nord du Sénégal

3-2-1. Identification de la démarche et explication de l'outil HDM-4

En accord avec la méthodologie proposée pour le choix de l'intervention dans cet article à la section 3, notre étude nous a permis grâce à l'outil HDM-4 de faire une simulation et d'analyser les courbes de détérioration des *Figures 1 à 7*. Celle qui traite la cause de détérioration et qui assure tout au long de la durée de vie de la route, un très grand confort au roulement (un bon IRI) est retenue. HDM-4 un outil flexible qui permet de modéliser la détérioration des chaussées dans le temps selon les interventions qui y sont appliquées, d'évaluer la viabilité économique de diverses alternatives de réhabilitation et les stratégies d'entretien des chaussées à moyen et long termes [35]. Il a été développé par la Banque Mondiale et diverses autres organisations sous l'égide de l'Association Internationale Permanente des Congrès de la Route (AIPCR) par l'équipe de l'Université de Birmingham. Il a permis d'utiliser les modèles empiriques basés sur des expériences réelles réalisées sur la route RN2 au Sénégal pour simuler l'évolution du comportement des chaussées selon diverses options de réhabilitation. Il a aussi permis d'effectuer une analyse de sensibilité pour voir l'effet de l'écart entre les données fournies au système ainsi que des hypothèses retenues, par rapport aux données réelles. De mesurer la robustesse des recommandations qui demeurent sujettes aux estimations des paramètres d'entrées significatifs, et cela par rapport à chacun des paramètres, tels le coût d'investissement des travaux, la croissance du trafic normal des véhicules et le trafic moyen journalier annuel (TJMA) post-travaux.

3-2-2. Présentation et interprétation des résultats

Les critères à considérer pour l'évaluation des résultats porte sur les modèles des courbes d'exploitation des véhicules sur la route RN2 au Sénégal entre Richard Toll et N'Dioum en se basant sur l'uni exprimé en IRI. Les critères de qualification de l'uni retenus pour cette route nationale sont les suivantes :

- $IRI < 1,6$ m/km Excellent
- $1,6 < IRI < 2,6$ m/km Bon
- $2,6 < IRI < 3,6$ m/km Moyen
- $3,6 < IRI < 4,6$ m/km Pauvre
- $4,6 < IRI$ Très pauvre

Pour maintenir la chaussée toujours en bon état, il faut que l'IRI reste inférieur à 2,6 m/km jusqu'au prochain entretien périodique en choisissant une option optimale de réhabilitation qui sera rentable sur le cycle de vie. Dans cette étude, on a fait ressortir les **7 Figures** des courbes d'évolution de l'IRI en fonction du temps pour les différentes options de réhabilitation. On ne retient que dans chaque figure, l'option qui est la plus rentable en termes d'IRI à comparer à celle de base et aux autres options parmi les simulations qui ont été faites. Le **Tableau 9** nous donne la variation de l'IRI dans les différentes options du projet.

Tableau 9 : La variation de l'IRI dans les différentes options du projet

IRI	Option de base	Option 1	Option 2	Option 3	Option 4
Figure 1	2.9 m/km à 6.1 m/km	2.9 m/km à 3.6 m/km	2.9 m/km à 3.4 m/km	2.9 m/km à 2.1 m/km	2.9 m/km à 3.5 m/km
Figure 2	2.9 m/km à 6.1 m/km	2.9 m/km à 3.6 m/km	2.9 m/km à 3.4 m/km	2.9 m/km à 2.1 m/km	2.9 m/km à 3.5 m/km
Figure 3	2.9 m/km à 6.1 m/km	2.9 m/km à 3.6 m/km	2.9 m/km à 3.4 m/km	2.9 m/km à 2.1 m/km	2.9 m/km à 3.5 m/km
Figure 4	2.9 m/km à 5.9 m/km	2.9 m/km à 3.4 m/km	2.9 m/km à 3.1 m/km	2.9 m/km à 2.0 m/km	2.9 m/km à 3.3 m/km
Figure 5	2.9 m/km à 6.6 m/km	2.9 m/km à 4.2 m/km	2.9 m/km à 3.9 m/km	2.9 m/km à 2.1 m/km	2.9 m/km à 4.1 m/km
Figure 6	2.9 m/km à 5.9 m/km	2.9 m/km à 3.4 m/km	2.9 m/km à 3.2 m/km	2.9 m/km à 2.0 m/km	2.9 m/km à 3.3 m/km
Figure 7	2.9 m/km à 6.4 m/km	2.9 m/km à 4.0 m/km	2.9 m/km à 3.8 m/km	2.9 m/km à 2.1 m/km	2.9 m/km à 3.9 m/km

D'après les valeurs de l'IRI des **Figures 1 à 7** présentées au **Tableau 9**, il ressort que les valeurs de l'IRI montrent pour chaque option la progression annuelle des différentes dégradations sur la période d'analyse. Ces figures affichent l'IRI moyen annuel pour chaque option. Ainsi chaque figure permet d'apprécier l'évolution et les années de déclenchement des travaux. Ce qui nous permet de constater que d'après les critères de qualification de l'IRI retenus pour cette route nationale, seule l'option 3 a un IRI inférieur à 2,6 m/km sur tout l'ensemble de projet et sur les différentes figures de l'analyse de sensibilité. D'où la nécessité de faire la conclusion suivante : pour maintenir la chaussée en bon état durant tout le cycle de vie de la route, il faut utiliser l'option 3 (route en béton). Les courbes d'évolution de l'IRI pour les quatre options de réhabilitation simulées et retenues sur le projet de la route RN2 au Sénégal entre Richard Toll et N'Dioum et ceux des différentes analyses de sensibilités sont présentées dans les **Figures 1 à 7**.

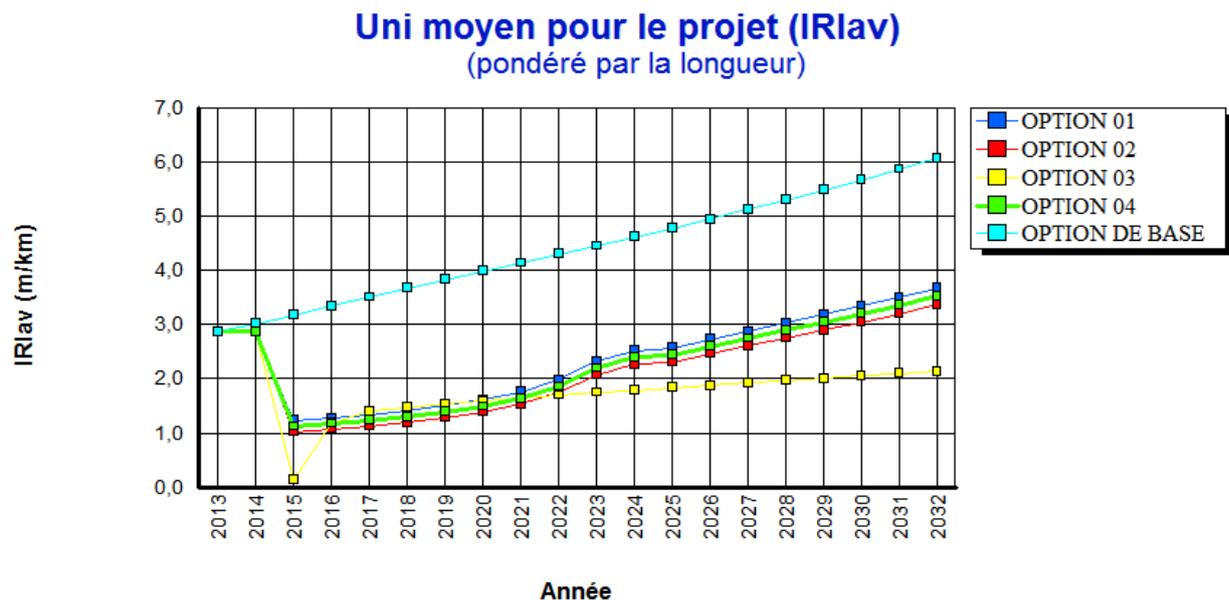


Figure 1 : *Évolution de l'uni de chaque option par rapport au scénario de base*

D'après la **Figure 1**, l'option de base à un IRI qui varie entre 2.9 m/km à 6.1 m/km ce qui maintient à un état médiocre la chaussée tout au long du projet. Les options 1, 2 et 4 ont un IRI qui décroît de 2.9 m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 1.2 m/km pour l'option 1, 1 m/km pour l'option 2 et 1.1 m/km pour l'option 4 après les travaux et il croît au fil des années pour atteindre 3.6 m/km pour l'option 1, 3.4 m/km pour l'option 2 et 3.5 m/km pour l'option 4. En ce qui concerne l'option 3, il a un IRI qui décroît de 2.9 m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 0.2 m/km après les travaux et il croît au fil des années pour atteindre 2.1 m/km.

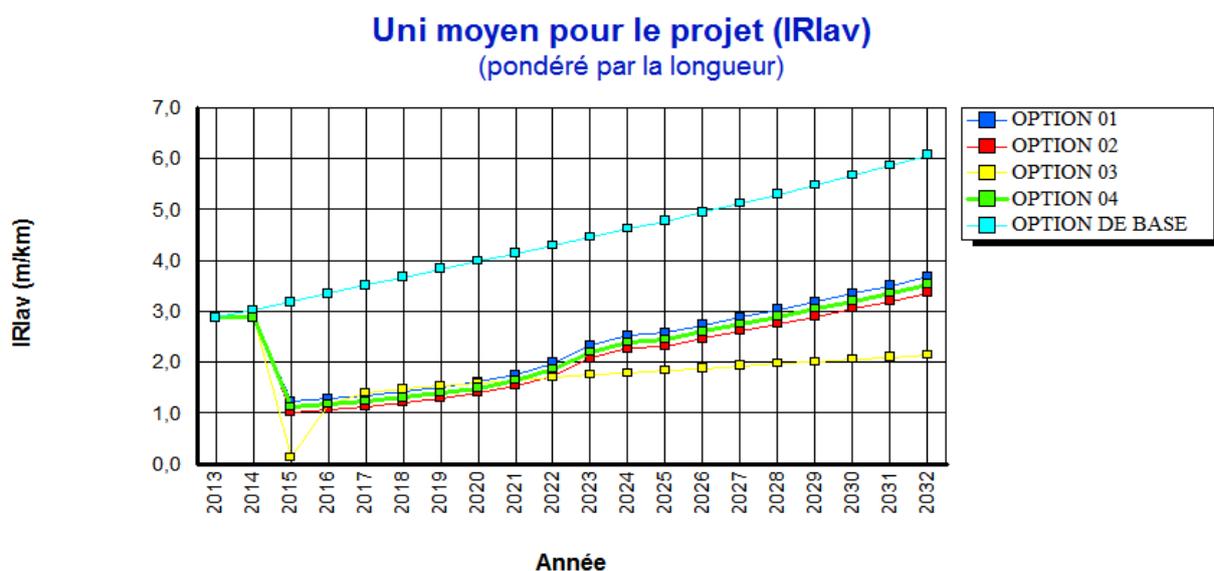


Figure 2 : *Évolution de l'uni selon le scénario du coût d'investissement +25 %*

D'après la **Figure 2**, l'option de base à un IRI qui varie entre 2.9 m/km à 6.1 m/km ce qui maintient à un état médiocre la chaussée tout au long du projet. Les options 1, 2 et 4 ont un IRI qui décroît de 2.9 m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 1.2 m/km pour l'option 1, 1 m/km pour l'option 2 et 1.1 m/km pour l'option 4 après les travaux et il croît au fil des années pour atteindre 3.6 m/km pour l'option 1, 3.4 m/km pour l'option 2 et 3.5 m/km pour l'option 4. En ce qui concerne l'option 3, il a un IRI qui décroît de 2.9 m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 0.2 m/km après les travaux et il croît au fil des années pour atteindre 2.1 m/km.

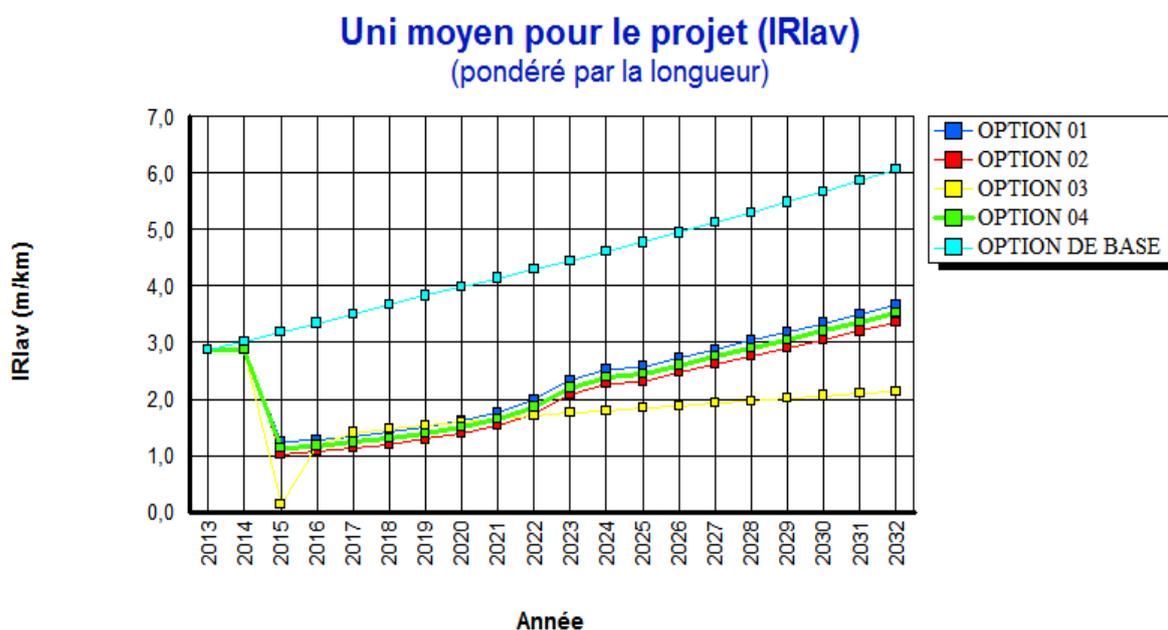


Figure 3 : Évolution de l'uni selon le scénario du coût d'investissement -25 %

D'après la **Figure 3**, l'option de base à un IRI qui varie entre 2.9 m/km à 6.1 m/km ce qui maintient à un état médiocre la chaussée tout au long du projet. Les options 1, 2 et 4 ont un IRI qui décroît de 2.9 m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 1.2 m/km pour l'option 1, 1 m/km pour l'option 2 et 1.1 m/km pour l'option 4 après les travaux et il croît au fil des années pour atteindre 3.6 m/km pour l'option 1, 3.4 m/km pour l'option 2 et 3.5 m/km pour l'option 4. En ce qui concerne l'option 3, il a un IRI qui décroît de 2.9 m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 0.2 m/km après les travaux et il croît au fil des années pour atteindre 2.1 m/km.

D'après la **Figure 4**, l'option de base à un IRI qui varie entre 2.9 m/km à 5.9 m/km ce qui maintient à un état médiocre la chaussée tout au long du projet. Les options 1, 2 et 4 ont un IRI qui décroît de 2.9 m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 1.2 m/km pour l'option 1, 1 m/km pour l'option 2 et 1.1 m/km pour l'option 4 après les travaux et il croît au fil des années pour atteindre 3.4 m/km pour l'option 1, 3.1 m/km pour l'option 2 et 3.3 m/km pour l'option 4. En ce qui concerne l'option 3, il a un IRI qui décroît de 2.9 m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 0.2 m/km après les travaux et il croît au fil des années pour atteindre 2.0 m/km.

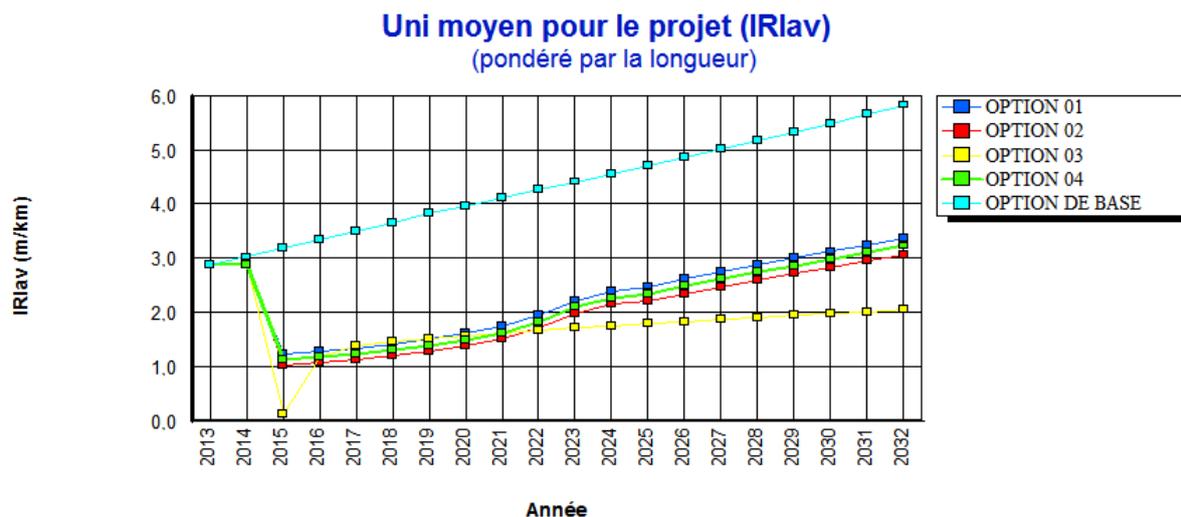


Figure 4 : Évolution de l'uni selon le scénario de croissance du trafic faible -70 %

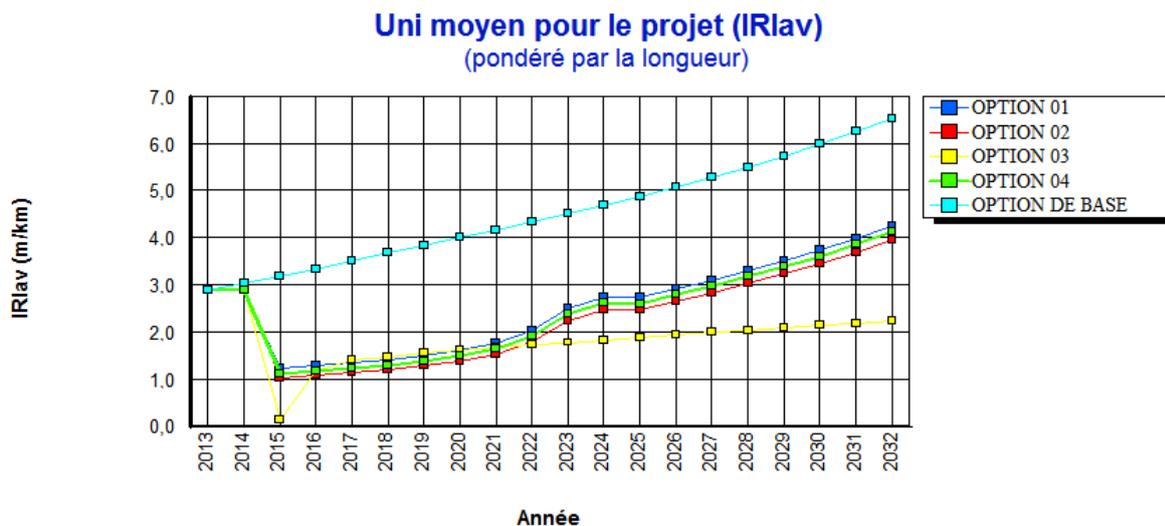


Figure 5 : Évolution de l'uni selon le scénario de croissance du trafic fort +70 %

D'après la **Figure 5**, l'option de base à un IRI qui varie entre 2.9 m/km à 6.6 m/km ce qui maintient à un état médiocre la chaussée tout au long du projet. Les options 1, 2 et 4 ont un IRI qui décroît de 2.9 m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 1.2 m/km pour l'option 1, 1 m/km pour l'option 2 et 1.1 m/km pour l'option 4 après les travaux et il croît au fil des années pour atteindre 4.2 m/km pour l'option 1, 3.9 m/km pour l'option 2 et 4.1 m/km pour l'option 4. En ce qui concerne l'option 3, il a un IRI qui décroît de 2.9 m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 0.2 m/km après les travaux et il croît au fil des années pour atteindre 2.1 m/km.

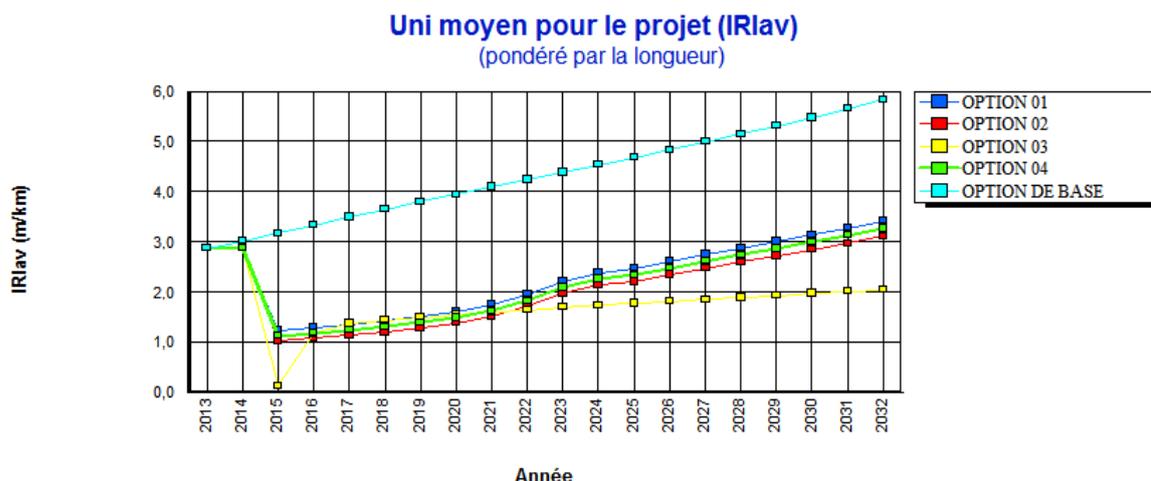


Figure 6 : Évolution de l'uni selon le scénario du TJMA faible -25 %

D'après la **Figure 6**, l'option de base à un IRI qui varie entre 2.9 m/km à 5.9 m/km ce qui maintient à un état médiocre la chaussée tout au long du projet. Les options 1, 2 et 4 ont un IRI qui décroît de 2.9m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 1.2 m/km pour l'option 1, 1 m/km pour l'option 2 et 1.1 m/km pour l'option 4 après les travaux et il croît au fil des années pour atteindre 3.4 m/km pour l'option 1, 3.2 m/km pour l'option 2 et 3.3 m/km pour l'option 4. En ce qui concerne l'option 3, il a un IRI qui décroît de 2.9 m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 0.2 m/km après les travaux et il croît au fil des années pour atteindre 2.0 m/km.

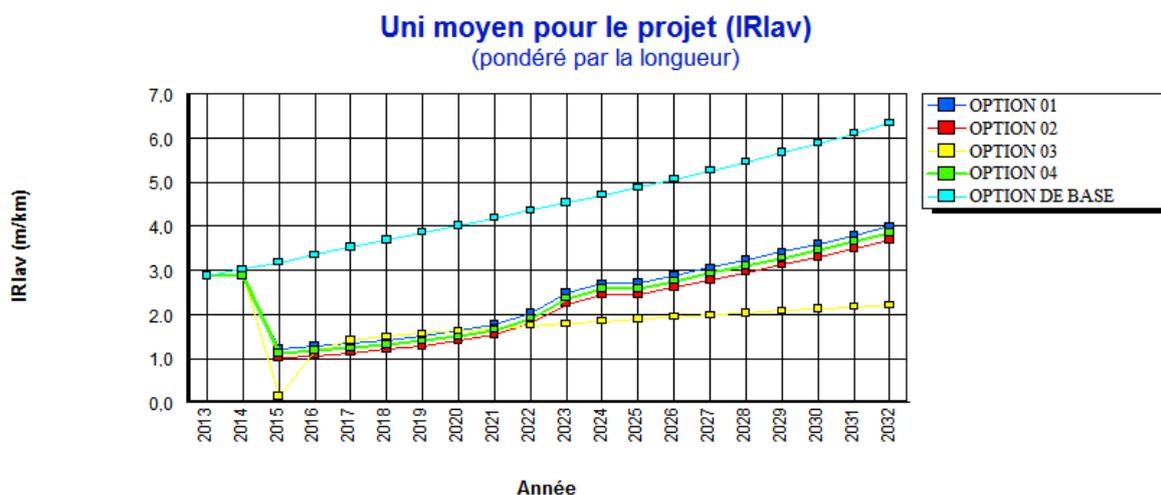


Figure 7 : Évolution de l'uni selon le scénario du TJMA fort +25 %

D'après la **Figure 7**, l'option de base à un IRI qui varie entre 2.9 m/km à 6.4 m/km ce qui maintient à un état médiocre la chaussée tout au long du projet. Les options 1, 2 et 4 ont un IRI qui décroît de 2.9 m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 1.2 m/km pour l'option 1, 1m/km pour l'option 2 et 1.1 m/km pour l'option 4 après les travaux et il croît au fil des années pour atteindre 4.0 m/km pour l'option 1, 3.8 m/km pour l'option 2 et 3.9m/km pour l'option 4. En ce qui concerne l'option 3, il a un IRI qui décroît de 2.9 m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 0.2 m/km après les travaux et il croît au fil des années pour atteindre 2.1 m/km.

D'après l'interprétation des courbes de détérioration de l'IRI de ce projet, il ressort de cela que, les différentes options de bitumage améliorent l'uni à la date des travaux, avec par la suite une lente détérioration. L'option 3 est en termes de confort au roulement (IRI), l'option la plus avantageuse techniquement et la plus rentable sur les **7 Figures** de la courbe d'évolution de l'uni avec un IRI variant de 0.2 m/km après la fin des travaux à 2.1 m/km au fil des années d'analyse du projet. Cette option est chère par rapport aux autres options, mais donne bien un IRI plus faible et moins d'entretien ce qui est un avantage considérable pour l'Afrique Subsaharienne car selon la banque mondiale, le problème des routes en Afrique Subsaharienne est le manque d'entretien [1].

4. Conclusion

L'approche développée dans cet article permet de mettre en évidence une méthodologie de réhabilitation des chaussées en Afrique Subsaharienne basé sur l'identification de la cause de détérioration. Celle-ci vise à choisir la meilleure intervention qui traite la cause de détérioration au moindre coût possible à long terme. Grâce à l'étude effectuée sur la route RN2 au Sénégal à l'aide de l'outil HDM-4 pour comparer les options d'intervention retenues, il en ressort que l'option 3 est la plus rentable en termes de confort au roulement (un bon IRI). Le béton représente une excellente solution dans le cadre de revêtements routiers pour soutenir les poids lourds en Afrique Subsaharienne car dans ces pays, les surcharges atteignent souvent 15 voire 20 tonnes par essieu contre 13 tonnes pour l'essieu de référence. Il est aussi important de noter que cette option du béton est chère par rapport aux autres options, mais donne bien un IRI plus faible et moins d'entretien ce qui est un avantage considérable pour l'Afrique Subsaharienne car selon la banque mondiale, le problème des routes en Afrique Subsaharienne est le manque d'entretien.

Références

- [1] - IAN G. HEGGIE, "Commercializing Africa's Roads : Transforming the Role of the Public Sector." *Transport Reviews* 15, no. 2 (1995) 167-184.
- [2] - GABRIEL J. ASSAF, *Sub-Network Level Analysis in Pavement Management: The Code and Marea Systems*, (1993).
- [3] - GABRIEL J. ASSAF, *Programme De Financement Des Travaux De Réhabilitation Des Routes 2000-2003. Banque Mondiale*, (1998) 148 p
- [4] - M. PEHLIVANIDIS, "Arc : An Expert Inspection System for Road Repairs. Québec (Qc) : Université De Montréal, Centre De Recherche Sur Les Transports. Ouvrage Inédit.", (1994).
- [5] - ROBERT TESSIER, "Guide De Construction et D'entretien Des Chaussées. Québec : "Association québécoise du transport et des routes", (1990) 393 p.
- [6] - CLAUDE BRUXELLES, "Construction Et Dimensionnement Des Chaussées" (2005).
- [7] - OCDE, *Manuel De Dégradations Des Chaussées Souple* (1978).
- [8] - SHRP, "Distress Identification Manual for the Long Term Pavement Performance Studies" (1990).
- [9] - MTQ, *Manuel D'identification Des Dégradations Des Chaussées Flexibles* : Québec : Gouvernement du Québec, Ministère des transports, (1993).
- [10] - MARTIN BOUCHER, *Revue Générale Et Comparaison De Systèmes De Gestion Des Chaussées* (1994) 192 p
- [11] - RALPH HAAS et W. RONALD HUDSON, *Pavement management systems*. Monograph (1978).
- [12] - Systematics, Cambridge, Texas Transportation Institute, National Cooperative Highway Research Program, Parsons Brinckerhoff, American Association of State Highway and Transportation Officials. *Performance Measures and Targets for Transportation Asset Management*. Vol. 551 : Transportation Research Board, (2006).

- [13] - DENIS ST-LAURENT, "Analyse Mécanique Des Chaussées et Rétrocalcul Des Modules " (2004).
- [14] - MTQ, *Contexte Particulier Des Chaussées Au Québec*, (2006).
- [15] - GABRIEL J. ASSAF, « Conception et réhabilitation des chaussées: note de cour MGC 840. École de Technologie Supérieure » (2010) 220 p.
- [16] - GABRIEL J. ASSAF, "A.G.L.R Project (Auscultation et gestion des Infrastructures Routière or Road Infrastructure Inspection and Management)." Québec : ministère des Transports du Québec, (1987).
- [17] - COOK, MIKE, STEPHEN SEEDS, HAIPING ZHOU and R GARY HICKS, "Guide for Investigating and Remediating Distress in Flexible Pavements: California Department of Transportation's New Procedure." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 1896 (2004) 147-161.
- [18] - M. I. PINARD, S. D. ELLIS, R. JOHANSEN, T. TOOLE, R. BEGER, M. E. GUMBIE, H. J. LOTTER and A. R. QUIMBY, "Guideline Low-Volume Sealed Roads " (2003).
- [19] - ZILIONIENE, DAIVA, DONATAS CYGAS, ANTANAS ALOYZAS JUZENAS and ALGIRDAS JURGAITIS, "Improvement of Functional Designation of Low-Volume Roads by Dust Abatement in Lithuania." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1989, no. 1 (2007) 293-298.
- [20] - Trade, Rapport Technique du West Africa, et N Hub. «Coûts de Transport et de Logistique sur le Corridor Lomé--Ouagadougou » (2012).
- [21] - PHILIPPE CABANIUS, "Amélioration du Transport de Transit dans la région d'Afrique Centrale." In *Première session du comité intergouvernemental préparatoire de la conférence ministérielle internationale sur la coopération en transport de transit*, New York, (2003).
- [22] - KOUBIKANA PAMBOU, *Développement D'un Catalogue De Conception Des Chaussées Pour Les Pays Sub-Sahariens*. École de technologie supérieure, (2013).
- [23] - FRANÇA, et JEAN-FRANÇOIS CORTÉ, *Conception et dimensionnement des structures de chaussée : guide technique* (1994).
- [24] - HUANG, "Pavement Analysis and Design." *University of Kentucky. Prentice Hall, inc. USA*, (1993).
- [25] - PIERRE, PASCALE, ALEXA BRESSON and SYLVAIN JUNEAU, " Suivi Structural Saisonnier De Chaussées Municipales En Région Nordique " (2008).
- [26] - GABRIEL J. ASSAF, *Manuel De Conception Routier Pour L'évaluation Des Techniques D'entretien* (1986) 146 p
- [27] - JEAN CARRIER, CHARTRAND LUC, DURAND JEAN-MARIE, FLON PAUL, GRONDIN MATHIEU et MARCEL NICOLAS, *Guide de mesures et d'identification des dégradations des chaussées souples* (2007).
- [28] - DURGA PRASAD OSTI, "Choice of Bituminous Otta Seal Surfacing an Economic Pavement Surfacing for Low Volume Roads." *TRANSPORT AND COMMUNICATIONS BULLETIN FOR ASIA AND THE PACIFIC*, (1993) 23 p
- [29] - SUSANNE SOEDERBERG, "American Empire and 'Excluded States': The Millennium Challenge Account and the Shift to Pre-Emptive Development." *Third World Quarterly* 25, no. 2 (2004) 279-302.
- [30] - ADAMA DIONE, « Dimensionnement routier au Sénégal, quelles perspectives? » (2011).
- [31] - DENIS DUHAMEL, ARMELLE CHABOT, PHILIPPE TAMAGNY et LARBI HARFOUCHE, « Logiciel de modélisation viscoélastique des chaussées bitumineuses ». *BULLETIN DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSÉES*, (2005) vol. 258, p 259.
- [32] - CEBTP, *Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux* (1984).
- [33] - LUC RENS, « La route en béton une solution économique et de qualité ». *FEBELCEM*. (2013).
- [34] - KERALI, HENRY GR, JB ODOKI et ERIC E STANNARD, «Vue d'ensemble de HDM-4 », (2005).
- [35] - T. WATANATADA, W. D. PATERSON, A. BHANDARI, C.G. HARRAL, A. M. DHARESHWAR et K. TSUNOKAWA, « The highway design and maintenance standards model, volumes 1 and 2 » (1997).