

## **Intégration de la dimension environnementale en gestion des routes dans les pays d'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](mailto:thierrymbog@yahoo.fr)

### **Résumé**

Cet article présente une méthodologie de réhabilitation des chaussées qui intègre la dimension environnementale dans la gestion des routes en Afrique subsaharienne et permet de lutter contre le changement climatique. Le but recherché est d'aider les ingénieurs dans leurs prises de décision lors des travaux de réhabilitation des chaussées afin de diminuer la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre par véhicule, ce qui permettra de lutter efficacement contre le changement climatique. Pour illustrer l'approche proposée, une étude expérimentale est effectuée. Cette étude vise à comparer plusieurs options d'intervention retenue sur un tronçon de près de 120 km de la route RN2 au Sénégal grâce à une analyse environnementale avec l'outil HDM-4 de l'AIPCR (Association Mondiale des routes) en support pour le choix de la solution optimale.

**Mots-clés** : *impacts environnementaux, émissions de gaz à effet de serre, consommation d'énergie, dégradation de la chaussée, changement climatique, Afrique subsaharienne.*

### **Abstract**

**Integration of the environmental dimension in the management of roads in Sub-Saharan Africa**

To better integrate the different environmental impacts in road management and fight against climate change in sub-Saharan Africa, this article presents a methodology for pavement rehabilitation which makes the correlation between the energy consumption, the emissions of greenhouse gases, and the deterioration of the road and climate change in roads management in Sub-Saharan Africa. The desired aim is to help engineers apply this methodology when performing the works of road rehabilitation, in order to reduce the emission of greenhouse gases per vehicle, which will be effective in the fight against climate change. To illustrate the proposed approach, an experimental study is performed. This study aims to compare several intervention options on a stretch of nearly 120 km of route RN2 in Senegal, through an environmental analysis with the HDM-4 tool from *PIARC* (World Road Association) in support for the choice of the optimal solution.

**Keywords** : *environmental impacts, emissions of greenhouse gases, energy consumption, pavement degradation, climate change, sub-Saharan Africa.*

## 1. Introduction

### 1-1. Problématique

Les impacts environnementaux causés par la route sont proportionnels aux caractéristiques de la chaussée. Ils sont rarement pris en compte en Afrique subsaharienne par les administrations routières dans leur processus de décision pendant les phases de conception, de réhabilitation et d'utilisation de la chaussée. Cette défaillance entraîne des choix de gestion techniquement acceptables, mais insuffisants pour la société dans son ensemble. La question qui se pose est de savoir comment on peut intégrer de façon efficace et pertinente, les effets néfastes qu'ont les routes sur leur environnement dans le processus de la gestion des infrastructures routières. La communauté internationale [1] y répond en prônant l'approche du développement durable. En effet, si la gestion des routes vise à intégrer certains paramètres environnementaux pertinents dans ses processus de prise de décision, il en résulte une route plus adaptée à son environnement, c'est-à-dire moins nuisible. C'est dans cet esprit que cet article met en évidence une méthodologie de réhabilitation qui permet de réduire la consommation d'énergie et le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) qui est d'après [2] est le principale gaz qui contribue de manière la plus significative à l'effet de serre considéré comme la principale cause du changement climatique.

### 1-2. État de l'art

#### 1-2-1. Revue de la littérature

Contrairement aux pays d'Afrique subsaharienne, les pays développés ont commencé à intégrer les impacts environnementaux dans la gestion de leurs routes. La prise en compte de ces impacts environnementaux permet d'intégrer la gestion des routes dans un contexte plus global et d'établir les choix techniques concernant les chaussées qui se feront bien plus durables pour la société dans son ensemble [1]. Les impacts environnementaux sont souvent intégrés dans la réflexion sur les projets routiers, on parle alors d'internaliser les effets externes du transport. Mais ce n'est que récemment que les premières études faisant appel à la monétarisation de ces effets ont été utilisées dans le cadre de la gestion d'infrastructures routières [3]. L'avantage de la monétarisation est que l'impact environnemental de la route est intégré dans le calcul même des coûts et bénéfices qui la concernent [4]. Dès à présent, la prise en compte de l'estimation de l'impact environnemental et social des projets routiers par les organismes internationaux est une réalité [5]. Les Nations Unies proposent aujourd'hui d'évaluer en continu l'impact des projets routiers sur leur environnement en mettant à contribution la participation de la population et des professionnels [3].

Cela est assuré au Québec depuis 1978 par le BAPE (Bureau d'Audiences Publiques sur l'Environnement) visant à évaluer les préoccupations environnementales sur les projets routiers en faisant appel à la participation du public. Malgré cette nécessité généralement admise, il n'en demeure pas moins que peu de gestionnaires des chaussées tiennent compte des impacts environnementaux dans leurs décisions. En effet, rares sont les administrations routières qui n'ont pas encore pris conscience de la nécessité de l'intégration des impacts environnementaux dans la gestion des routes mais qu'ils l'appliquent réellement sur le terrain [6]. Afin d'aider ces gestionnaires dans leur projet routier, certains auteurs en l'occurrence [3, 7, 8] ont développé les outils pour quantifier les impacts environnementaux. Toutefois, comme l'indique [3] ces nouveaux outils de gestion ne se concentrent chacune uniquement que sur certains impacts tels que le bruit [9], les émissions de gaz atmosphérique [10] et les changements climatiques [11]. Par ailleurs, [12] montre qu'il existe un lien direct entre les émissions des gaz à effet de serre par les véhicules et la consommation en carburant de ces

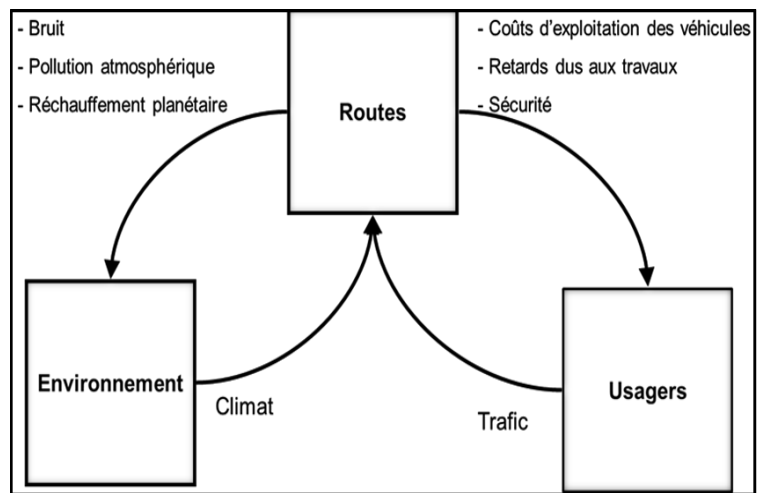
mêmes véhicules. [13] quant à eux montrent que plus l'uni de la chaussée est mauvais plus il y a de gaz à effet de serre émis par les véhicules qui y circulent. Basé sur ces constatations et efforts, il est aisé de conclure qu'il est nécessaire d'intégrer la dimension environnementale dans les projets routiers entrepris en Afrique subsaharienne.

**1-2-2. Les indicateurs d'impacts entre la route et l'environnement**

Dans le contexte actuel où les principes du développement durable sont appelés à intégrer les pratiques de gestion, il apparaît nécessaire de prendre en compte les impacts environnementaux dans le processus de gestion des routes.

**1-2-2-1. Les impacts de l'environnement sur la route**

L'état des routes est solidaire de la structure de la chaussée c'est-à-dire, du type de chaussée et des matériaux utilisés pour sa construction. Mais d'autres facteurs comme le trafic, le climat et l'âge de la chaussée ont une influence sur la dégradation et sur l'état des chaussées [14] tel qu'illustré à la **Figure 1**.

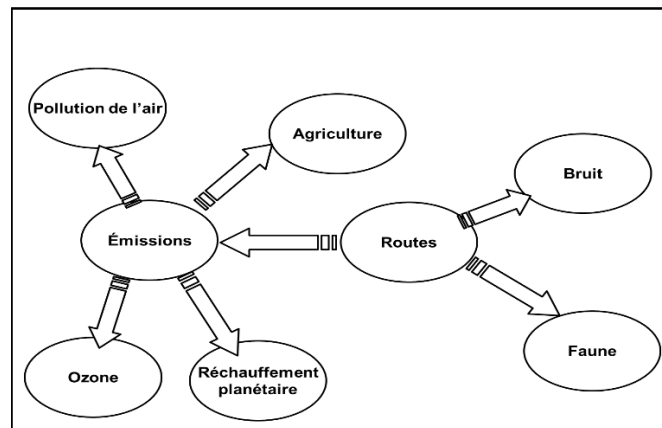


**Figure 1 : Influence des routes sur l'environnement et les usagers**

Contrairement au passé où la gestion des routes ne tenait compte que des éléments directement liés à la chaussée et à son état [15], aujourd'hui elle tient compte de son environnement pour maintenir l'efficacité de la route. La prise en compte de ces informations permet de mieux concevoir, entretenir et réhabiliter ces chaussées en prévoyant dans le temps et l'espace les dégradations qu'elles subissent. L'ensemble des caractéristiques environnementales, structurelles, mécaniques et du trafic que la chaussée devra supporter sont prises en compte par la nouvelle version du modèle OPAC (Ontario Pavement Analysis of Costs) [16].

**1-2-2-2. Les impacts de la route sur l'environnement**

Les projets d'entretien, de réhabilitation et de construction des chaussées ont un impact non négligeable sur l'environnement et sur les usagers [17]. En vue de perpétuer la politique actuelle de développement durable, il est important de mentionner l'impact des routes sur divers éléments de l'environnement, soit la qualité de l'air, le réchauffement planétaire et les milieux humides. La **Figure 2** montre les mécanismes d'impact des routes sur leur environnement [3].



**Figure 2 :** Les mécanismes d'impact des routes sur leur environnement

Il convient de noter que les coûts d'exploitation des véhicules, les retards dus aux travaux et la sécurité sont les coûts aux usagers engendrés par la route. Par contre, le bruit, la pollution atmosphérique et le réchauffement planétaire sont les coûts sociaux et environnementaux engendrés par la route [3]. Le bruit routier est un élément environnemental bien couvert par la FHWA (*Federal Highway Administration*). C'est une nuisance importante pour les riverains de la route car le bruit provient essentiellement des frottements de l'air sur les véhicules, des moteurs des véhicules et l'interface pneumatique/chaussée [18]. Il est d'ailleurs déjà pris en compte dans tous les projets routiers américains [19]. Mais il reste rarement utilisé dans les analyses de coûts et bénéfices lors de la gestion des routes [20]. En ce qui concerne les émissions de gaz atmosphériques, leur accroissement est en grande partie dû à la consommation d'essence et l'arrachement de matière aux pneumatiques des véhicules qui augmentent avec la rugosité du revêtement [13]. Pour limiter cela, il faut faire une bonne planification afin de limiter les travaux à réaliser, choisir les matériaux appropriés pour une conception durable et maintenir sur le long terme un bon IRI. Le réchauffement planétaire quant à lui est dû en grande partie aux gaz à effet de serre ( $\text{CO}_2$ ) émis dans l'atmosphère et permet aux gestionnaires d'infrastructures routières de quantifier monétairement l'impact sur l'état des chaussées [21]. Lors de la gestion des routes, il sera important de prendre en compte l'émission de gaz à effet de serre liée au mauvais état des chaussées et l'émission de gaz à effet de serre due aux travaux d'entretien et de réhabilitation des chaussées et aux congestions liées à ces travaux [3].

### 1-2-2-3. Quantification des impacts environnementaux pour le changement climatique

Les émissions de plusieurs gaz en occurrence le  $\text{CO}_2$  envoyé dans l'atmosphère, va augmenter l'effet de serre, ce qui est considéré comme la principale cause du changement climatique [22]. Ce changement climatique pourrait avoir des conséquences néfastes sur les chaussées, lesquels vont s'observer par :

- ✓ L'augmentation prévue des précipitations extrêmes qui vont forcément causer un affaiblissement des structures de chaussée en enrobé mais plus encore celles en gravier ou en terre et donc une durée de vie nécessairement plus courte. Ce qui nécessitera un accroissement des interventions d'entretien et possiblement des interventions de réhabilitation;
- ✓ En corollaire de la constatation précédente, l'augmentation de l'écoulement des eaux pourrait provoquer plus d'inondations, donc de l'érosion voire des emportements et des pertes d'accès. Ce qui nécessitera la conception de systèmes de drainage pour des inondations importantes et donc de facto causera l'augmentation des coûts de construction;
- ✓ L'augmentation de la température qui va nécessairement provoquer le ramollissement des bitumes qui composent les couches de roulement en enrobé bitumineux, l'accroissement des ornières, des

bourrelets et du ressuage en corollaire. Ceci nécessitera la sélection de bitumes à la plage d'utilisation plus large pour réduire la sensibilité desdits bitumes à la température. En corollaire il en résultera nécessairement une prochaine intervention plus fréquente et plus coûteuse pour ce qui concerne les couches de roulement en enrobé. Il est à noter, qu'a priori, les chaussées avec revêtement en béton seront épargnées.

D'après toutes ces observations, il apparaît donc urgent d'intégrer les impacts environnementaux dans la gestion des routes en Afrique subsaharienne, d'où la nécessité de présenter une méthodologie dans cet article. Celle-ci permettra de diminuer la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre par véhicule, ce qui aura comme conséquence de lutter efficacement contre le changement climatique.

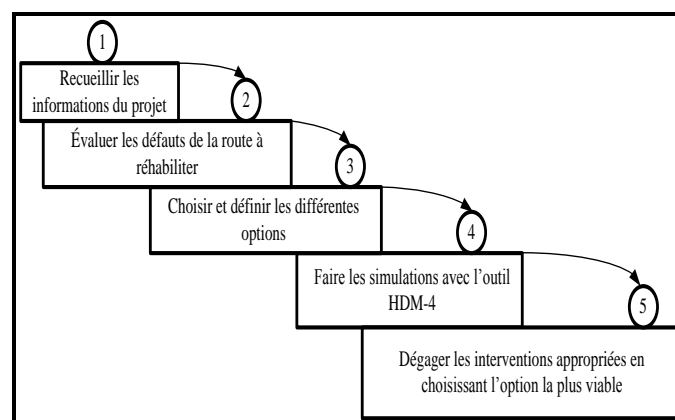
## 2. Méthodologie

### 2-1. Méthodologie d'intégration de la dimension environnementale dans la gestion des routes en Afrique subsaharienne

Pour réhabiliter une chaussée dans le but de diminuer la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre par véhicule et lutter contre le changement climatique, il faut intégrer la dimension environnementale dans chaque projet afin de trouver les solutions appropriées. Cette méthodologie s'articule comme suit :

- I. recueillir les informations du projet;
- II. évaluer 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;
- III. choisir et définir les différentes options de réhabilitation de la route;
- IV. faire les simulations à l'aide de l'outil HDM-4 de l'AIPCR (Association Mondiale des Routes) afin d'évaluer et de comparer pour chaque option choisie dans le projet, la consommation d'énergie et les émissions de gaz;
- V. dégager les interventions appropriées en choisissant l'option dont la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre est plus bas, ce qui donne un bon présage pour la lutte contre le changement climatique.

La **Figure 3** ci-dessous représente l'arborescence structurée pour l'étude environnementale d'une réhabilitation.



**Figure 3** : Arborescence structurée pour l'étude environnementale d'une réhabilitation

### 3. Résultats et discussion

#### 3-1. Étude du projet

##### 3-1-1. Données du projet

Dans le cadre de la mise en œuvre d'un nouveau programme d'assistance étrangère, 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. Les différentes options retenues dans ce projet

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 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 [23] combinaison des indices de qualité avec le trafic, pour déterminer une structure de renforcement. Les vérifications ont été faites par le logiciel Alizé [24] 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.

L'option 2 quant à elle consiste à pulvériser l'enrobé 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 [25]. 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 les modèles de comportement développés par [26] 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'enrobé au maximum 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.

**3-1-3. Méthode de l'étude**

Pour réaliser cette étude sur la RN2, nous avons utilisé le logiciel HDM-4 [27] dans le but d'évaluer et de comparer pour chaque options choisie dans l'étude de ce projet de réhabilitation, la consommation d'énergie et les émissions de gaz. Et enfin, de voir leurs impacts sur le changement climatique de chaque option du projet. 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 [28]. 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 pour justifier le choix de la méthodologie de réhabilitation des chaussées. Dans le cadre de ce travail, HDM-4 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. Le **Tableau 1** 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 2,8 m/km. Cet 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 1 : 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
Épaisseur des couches de la chaussée existante	Fondation : 400 mm
	Base : 200 mm
	Revêtement : 50 mm
Capacité de portance du sol, CBR	Sol de plateforme : CBR 21 %

Le **Tableau 2**, 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. Cet 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 2 : 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

### **3-1-4. Les différents défauts et les causes de détériorations du projet de la RN2**

Le projet a été divisé en 11 sections dépendamment des dégradations et des profils en travers types de chaque section. Le **Tableau 3** tabule les différentes sections, leurs dégradations ainsi que leurs profils en travers type.

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).



**Tableau 3 : 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.

### 3-2. Résultats expérimentaux et discussion

#### 3-2-1. Comparaison des émissions des gaz et consommation d'énergie par options durant le cycle de vie du projet

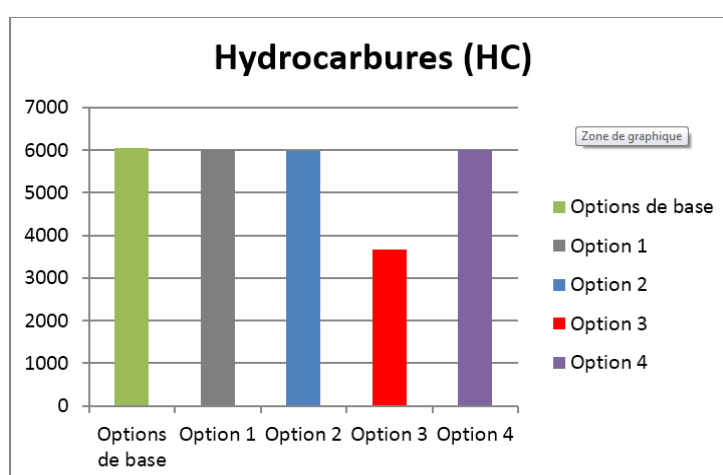
Les simulations effectuées avec le logiciel HDM-4 nous ont permis de faire ressortir les différentes émissions de gaz et la consommation d'énergie par option pour les quatre sections représentatives du projet afin de pouvoir comparer les différentes options du projet.

##### 3-2-1-1. Les émissions de gaz

Le **Tableau 4** et les **Figures 3 à 9** ci-dessous résument les résultats obtenus des émissions de gaz, par options, durant 20 ans, pour les différents gaz émis par le projet.

**Tableau 4 : Les émissions de gaz par options durant 20 ans**

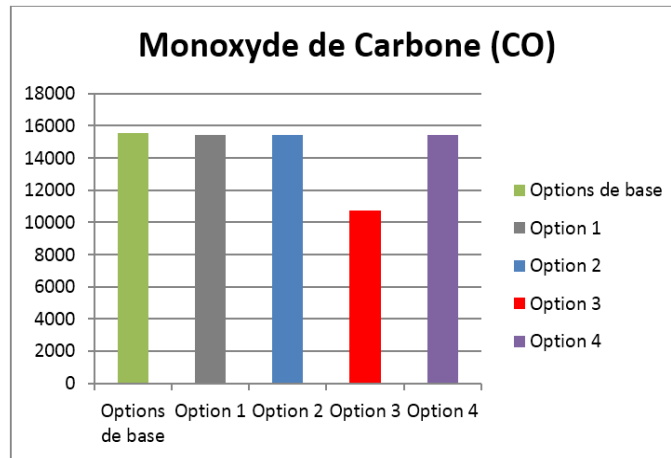
Options	Quantités en tonnes durant 20 ans						
	Hydrocarbures (HC)	Monoxyde de carbone (CO)	Oxydes d'azote (NO <sub>x</sub> )	Dioxyde de soufre (SO <sub>2</sub> )	Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	Particules (Par)	Plomb (Pb)
Option de base	6 042	15 555	5 932	444	529 742	1 419	19
Option 1	5 993	15 442	5 892	440	525 776	1 407	19
Option 2	5 988	15 427	5 886	441	525 279	1 406	19
Option 3	3 656	10 713	4 289	254	356 848	824	18
Option 4	5 991	15 434	5 889	440	525 528	1 407	19



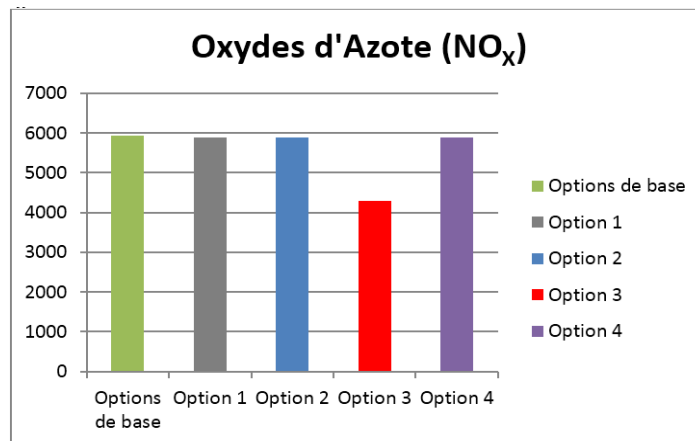
**Figure 4 : Graphique des émissions d'Hydrocarbures (HC) par options durant 20 ans**

D'après la **Figure 4**, il ressort que l'émission d'hydrocarbures (HC) est beaucoup plus faible de l'ordre de 39 % pour l'option 3 par rapport aux autres options.

D'après la **Figure 5**, il ressort que l'émission du Monoxyde de Carbone (CO) est beaucoup plus faible de l'ordre de 31 % pour l'option 3 par rapport aux autres options.

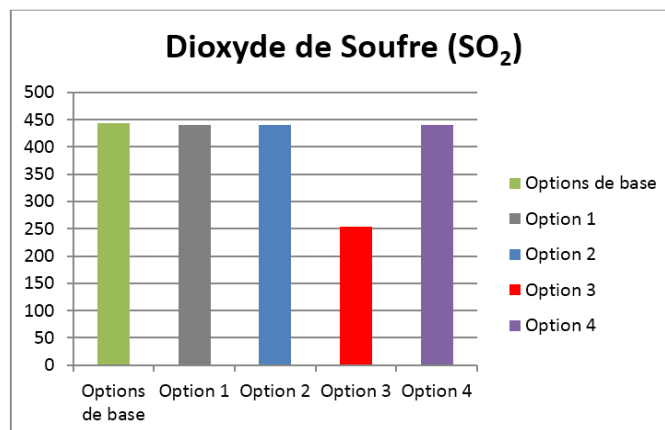


**Figure 5 :** Graphique des émissions du Monoxyde de Carbone (CO) par options durant 20 ans



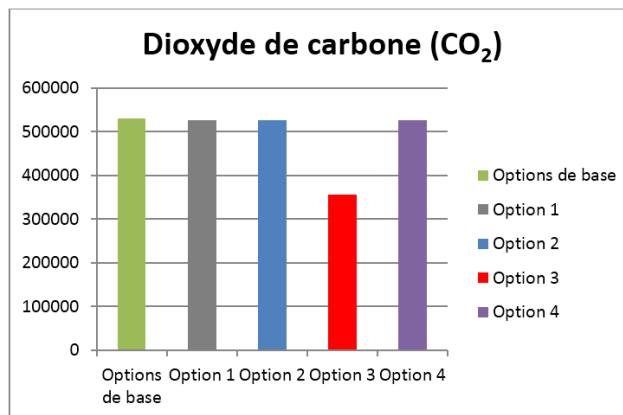
**Figure 6 :** Graphique des émissions d'Oxydes d'Azote (NO<sub>x</sub>) par options durant 20 ans

D'après la **Figure 6**, il ressort que l'émission d'Oxydes d'Azote (NO<sub>x</sub>) est beaucoup plus faible de l'ordre de 27 % pour l'option 3 par rapport aux autres options.



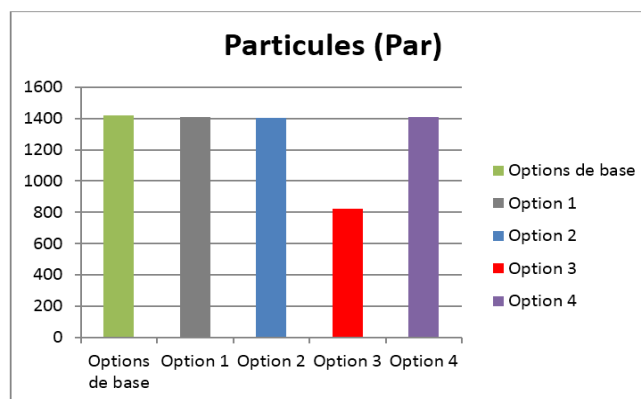
**Figure 7 :** Graphique des émissions du Dioxyde de Soufre (SO<sub>2</sub>) par options durant 20 ans

D'après la **Figure 7**, il ressort que l'émission de Dioxyde de Soufre ( $\text{SO}_2$ ) est beaucoup plus faible de l'ordre de 42 % pour l'option 3 par rapport aux autres options.



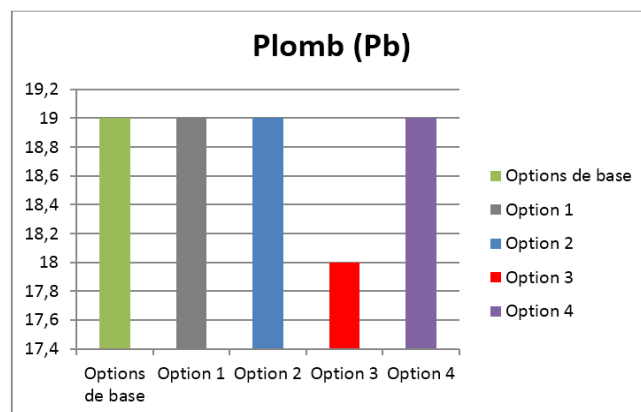
**Figure 8 :** Graphique des émissions du Dioxyde de Carbone ( $\text{CO}_2$ ) par options durant 20 ans

D'après la **Figure 8**, il ressort que l'émission du Dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) est beaucoup plus faible de l'ordre de 32 % pour l'option 3 par rapport aux autres options.



**Figure 9 :** Graphique des émissions de Particules (Par) par options durant 20 ans

D'après la **Figure 9**, il ressort que l'émission de Particules (Par) est beaucoup plus faible de l'ordre de 41 % pour l'option 3 par rapport aux autres options.



**Figure 10 :** Graphique des émissions du Plomb (Pb) par options durant 20 ans

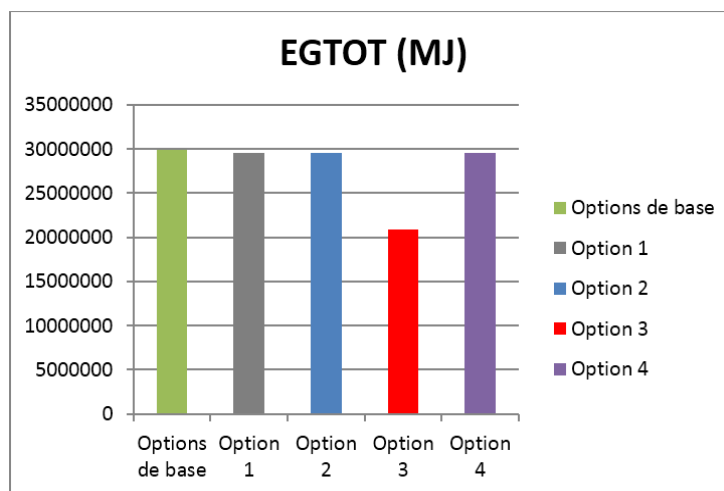
D'après la **Figure 10**, il ressort que l'émission du plomb (Pb) est beaucoup plus faible de l'ordre de 5 % pour l'option 3 par rapport aux autres options. Il ressort des résultats que l'émission du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) qui est le gaz qui contribue de manière la plus significative à l'effet de serre est beaucoup plus faible pour l'option 3 par rapport aux autres options. D'où la nécessité de considérer des revêtements en béton pour une réhabilitation des chaussées en Afrique subsaharienne si l'on veut diminuer les émissions de gaz à effet de serre et lutter contre le changement climatique.

**3-2-1-2. La consommation d'énergie**

Le **Tableau 5** et les **Figures 11 et 12** ci-dessous résument les résultats obtenus de la consommation d'énergie par option durant 20 ans pour les différentes sections représentatives du projet.

**Tableau 5 : La consommation d'énergie par options durant 20 ans**

Options	EGTOT (MJ)	ENTOT (MJ)
Option de base	29 861 180	24 581 608
Option 1	29 539 834	24 325 961
Option 2	29 513 165	24 303 257
Option 3	20 852 736	16 580 871
Option 4	29 526 410	24 314 620



**Figure 11 : Graphique de la consommation d'énergie par options durant 20 ans**

D'après la **Figure 11**, il ressort que la consommation d'énergie (EGTOT) est beaucoup plus faible de l'ordre de 30 % pour l'option 3 par rapport aux autres options.

D'après la **Figure 12**, il ressort que la consommation d'énergie (ENTOT) est beaucoup plus faible de l'ordre de 30 % pour l'option 3 par rapport aux autres options. Il ressort des résultats que les consommations d'énergie est beaucoup plus faible pour l'option 3 par rapport aux autres options. D'où la nécessité de considérer le revêtement en béton pour une réhabilitation des chaussées en Afrique subsaharienne en vue de diminuer les consommations d'énergie.

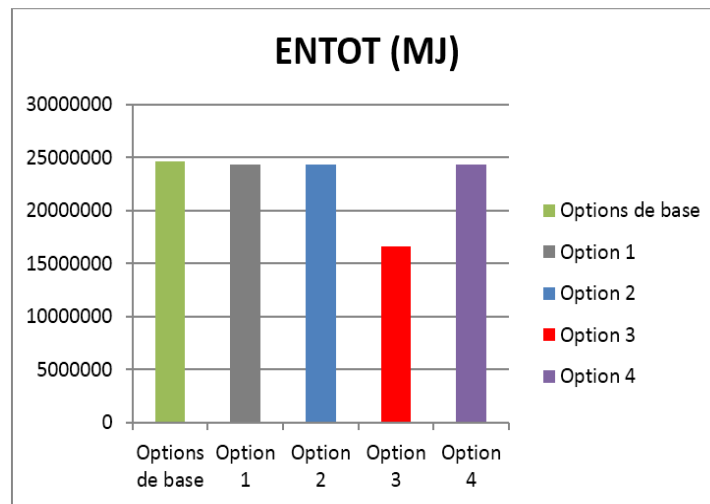


Figure 12 : Graphique de la consommation d'énergie par options durant 20 ans

#### 4. Conclusion

L'approche développée dans cet article est d'intégrer la dimension environnementale dans la gestion des routes en Afrique subsaharienne. Celle-ci passe par la mise sur pied d'une méthodologie qui permet de diminuer la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre par véhicule, ce qui permet de lutter contre le changement climatique. À la lumière de cette analyse effectuée sur la RN2 au Sénégal à l'aide de l'outil HDM-4, il ressort que l'intégration de la dimension environnementale en gestion des routes dans les projets en Afrique subsaharienne a un bénéfice considérable pour l'environnement et la société dans son ensemble. Il nous a permis grâce à la méthodologie mise en place de faire le choix technique concernant la chaussée qui se fait plus durable pour la société. Ce choix pointe vers un revêtement en béton car elle procure une économie d'énergie d'environ 30 % et une diminution des émissions de CO<sub>2</sub> d'environ 32 % comparée à d'autres options, ce qui représente un gain considérable en matière de lutte contre le changement climatique. L'un des avantages prépondérants de ce type de revêtement est sa longue durée de vie et son entretien extrêmement réduit, lorsqu'il est bien conçu et correctement mis en œuvre. L'autre avantage pertinent est qu'en fin de vie, les revêtements en béton démantelés pourront être employés dans des centres de concassage; et les granulats de béton réutilisés dans les couches de sous-fondation et de fondation ou comme gravillons pour des applications plus nobles.

#### Références

- [1] - LK. AMEKUDZI, ASTRID BRACHER, JAN MEYER, A. ROZANOV, H. BOVENSMANN et JP. BURROWS. « Lunar occultation with SCIAMACHY: First retrieval results ». *Advances in Space Research*, Vol. 36, N° 5, (2005) 906 - 914.
- [2] - SEINFELD, JOHN H, et SPYROS N PANDIS, *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons, (2012).
- [3] - LUC PELLECUER, « Modélisation des impacts environnementaux de la circulation routière en vue de leur intégration dans les systèmes de gestion des chaussées ». École de technologie supérieure, (2014).
- [4] - FRIEDRICH RAINER, ARI RABL et JOSEPH V SPADARO, « Quantifying the costs of air pollution: the ExternE project of the European Commission ». *Pollution Atmosphérique*, (2001) 77 - 104.

- [5] - F. RACIOPPI et C DORA, « Integrating Health Concerns into Transport Policies ». In *Environmental Health Impacts of Transport and Mobility*, (2005) 171 - 177.
- [6] - CHAN ARTHUR, GREGORY KEOLEIAN et ERIC GABLER, « Evaluation of life-cycle cost analysis practices used by the Michigan Department of Transportation ». *Journal of Transportation Engineering*, (2008).
- [7] - LIDICKER JEFFREY, NAKUL SATHAYE, SAMER MADANAT et ARPAD HORVATH, « Pavement resurfacing policy for minimization of life-cycle costs and greenhouse gas emissions ». *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 19, N° 2, (2012) 129 - 137.
- [8] - ZHANG HAN, GREGORY A KEOLEIAN et MICHAEL D LEPECH, « Network-level pavement asset management system integrated with life-cycle analysis and life-cycle optimization ». *Journal of Infrastructure Systems*, (2012).
- [9] - AHAMMED, M ALAUDDIN, et SUSAN L TIGHE, « Pavement surface friction and noise : integration into the pavement management system ». *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 37, n° 10, (2010) 1331 - 1340.
- [10] - YU BIN, et QING LU; « Life cycle assessment of pavement: Methodology and case study ». *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, vol. 17, n° 5, (2012) 380 - 388.
- [11] - WANG TING, IN-SUNG LEE, ALISSA KENDALL, JOHN HARVEY, EUL-BUM LEE et CHANGMO KIM, « Life cycle energy consumption and GHG emission from pavement rehabilitation with different rolling resistance ». *Journal of Cleaner Production*, vol. 33, (2012) 86 - 96.
- [12] - M. HUBERT, « Les coûts environnementaux de l'automobile: Une mise en perspective de l'évaluation ». *Note de méthode, IFEN*, n° 4, (2004) 199.
- [13] - BENNETT, R. CHRISTOPHER, et IAN D GREENWOOD, « Modelling road user and environmental effects in HDM-4 ». *HDM-4 Highway Development and Management. Volume seven. www. hdm-ims. com. Website visited January*, vol. 2, (2001) 2009 p.
- [14] - FALLS, LYNNE COWE, et SUSAN TIGHE, « Analyzing longitudinal data to demonstrate the costs and benefits of pavement management ». *Public Works Management & Policy*, vol. 8, n° 3, (2004) 176 - 191.
- [15] - KULKARNI, B. RAM, et RICHARD W MILLER, « Pavement management systems: Past, present, and future ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1853, n° 1, (2003) 65 - 71.
- [16] - TIGHE SUSAN, ZHIWEI HE et RALPH HAAS, « Environmental deterioration model for flexible pavement design: an Ontario example ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1755, n° 1, (2001) 81 - 89.
- [17] - FREEDMAN ALLAN, « In Profile: America's Leading Transportation Planning and Design Firms ». *Transportation Builder*, vol. 17, n° 7, (2005).
- [18] - BERNHARD, J. ROBERT et REBECCA S MCDANIEL, « Basics of noise generation for pavement engineers ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1941, n° 1, (2005) 161 - 166.
- [19] - HASSELMANN MARK, « Federal Highway Administration ». West Virginia University, (1995).
- [20] - J. LAMBERT, JM KAIL et E QUINET, « Transportation noise annoyance: an economic issue ». In *Proceedings of Noise-Effects*. Vol. 98, (1998).
- [21] - SCHREYER, CHRISTOPH, MARKUS MAIBACH, WERNER ROTHENGATTER, CLAUS DOLL, DAVID SCHMEDDING et CHRISTIAN SCHNEIDER, *External costs of transport: update study; final report*. Infrac, (2004).
- [22] - GORDON ROBERTSON, *Quantifier les Impacts du Changement Climatique pour le secteur routier de l'Afrique subsaharienne*. Coll. « Conference », (2011).
- [23] - DIONE ADAMA, « Dimensionnement routier au Sénégal, quelles perspectives? », (2011).

- [24] - DUHAMEL DENIS, ARMELLE CHABOT, PHILIPPE TAMAGNY et LARBI HARFOUCHE, « Logiciel de modélisation viscoélastique des chaussées bitumineuses ». *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, vol. 258, (2005) 259 p.
- [25] - CEBTP, *Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux*, (1984).
- [26] - RENS LUC, « La route en béton une solution économique et de qualité », (2013).
- [27] - KERALI HENRY GR, JB ODOKI et ERIC E STANNARD, « Vue d'ensemble de HDM-4 », (2005).
- [28] - T. WATANATADA, WD PATERSON, A. BHANDARI, CG. HARRAL, AM DHARESHWAR et K TSUNOKAWA, «The highway design and maintenance standards model. Volumes 1 and 2», (1997).