Etude de calage du modèle HDM-4 pour les chaussées en béton de ciment - (Cas d'une section de 18 km située à la province de Settat - Maroc)

Abdelilah Bannour, Mohamed Elomari, El-Khadir Lakhal, Mohamed Directeur de La Direction Des Routes Afechkar, Bouchra Lamrini, Pierre Joubert

▶ **To cite this version:**

Abdelilah Bannour, Mohamed Elomari, El-Khadir Lakhal, Mohamed Directeur de La Direction Des Routes Afechkar, Bouchra Lamrini, et al.. Etude de calage du modèle HDM-4 pour les chaussées en béton de ciment - (Cas d'une section de 18 km située à la province de Settat - Maroc). Congrès Algérien de Mécanique 25-29 octobre 2015, El Oued-Algérie , Oct 2015, El Oued, Algérie. 10.13140/RG.2.1.3705.7366 . hal-01460756

HAL Id: hal-01460756
https://hal.science/hal-01460756

Submitted on 7 Feb 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude de calage du modèle HDM-4 pour les chaussées en béton de ciment - (Cas d'une section de 18 km située à la province de Settat - Maroc)

*BANNOUR Abdelilah *(1), EL OMARI Mohamed(1), LAKHAL El Khadir(1), AFECHKAR Mohammed(2), LAMRINI Bouchra (3) et JOUBERT Pierre(4)*

(1) : Laboratoire d'Automatique de l'Environnement et Procédés de Transfert, Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc.

(2) : Directeur du Centre National d'Etudes et de Recherches Routière CNER, Rabat, Maroc.

(3) : Senior Research Engineer (R&D). Chargée de Recherche & Développement. Modeling, Diagnostics and Process Control, France

(4) : Consultant en HDM-4, Formateur en HDM à Ponts Formation Conseil. (Ponts Formation Conseil est l'organisme de formation issu de l'ENPC), France.

* abdelilah.bannour@edu.uca.ma

Résumé

Le travail présenté dans le cadre de cette étude vise à exploiter les modèles de détériorations des chaussées rigides intégrés au sein du logiciel HDM-4. Notre objectif est de caler expérimentalement ces modèles en fonction de la détérioration de la chaussée sur la RP3606, région El Gara à la province de Settat réalisée en 1990. La méthode de calage des modèles de comportement adoptée au sein de la HDM-4 consiste dans un premier temps à comparer les défauts prédits et observés par rapport aux valeurs observées pour la section témoin (section El Gara). Autrement, il s'agit d'établir des facteurs d'ajustement notés K_{xxx} qui permettent de minimiser l'erreur entre le modèle calé et les valeurs des défauts observés sur cette section. Cette méthode est basée sur un traitement des données en utilisant la régression linéaire simple où la variable dépendante est celle observée lors du relevé visuel effectué par le CNER. La valeur indépendante est celle prédite par le modèle HDM-4. Lors de cette étude, et selon les données acquises du relevé visuel réalisé par le CNER sur une durée de 23 ans, les résultats trouvés ont permis un bon calage des modèles suivants : le modèle de fissuration transversale avec un coefficient d'ajustement K=1.3, le modèle de l'épaufrure des joints transversaux pour K=1 et le modèle de l'uni pour K=0.93.

Abstract

The work presented within the framework of this study aims at exploiting the models of deteriorations of the rigid pavements integrated into his of the softwareHDM-4. Our objective is to fix in experiments these models according to the deterioration of the roadway on the RP3606, area El Gara with the province of Settat realized in 1990. The method of chock of the models of behavior adopted with his of the HDM-4 initially consists in comparing the defects predicted and observed compared to the actual values for the pilot section (section El Gara). Otherwise, it is a question of establishing noted factors of adjustment K_{xxx} which make it possible to minimize the error between the fixed model and the values of the defects observed on this section. This method is a study of simple linear regression where the dependent variable is the value observed during the visual survey conducted by the CNER. The independent value is that predicted by the HDM- 4. In this study, and according to the data acquired from the visual survey conducted by the CNER for a period of 23 years, has stalled the following models: Model of transverse cracking for an adjustment coefficient K=1.3, model spelling transverse joints for K=1 and the model of the universe for K=0.9.

I- Introduction

La problématique posée dans le cadre de cette étude, réside dans le fait de chercher un système de gestion des chaussées efficaces englobant tous les aspects techniques, économiques et sociaux reliés à la chaussée. Ce système doit fournir des informations nécessaires pour établir un programme de priorité dans l'objectif de réaliser une bonne intervention en temps et en espace. Ceci permettra de réduire le coût sur le cycle de vie de la chaussée. Afin de solutionner cette problématique moyennant une gestion traditionnelle, un nouvel outil doit être développé pour exploiter l'évaluation du comportement courant afin de prévoir, par des modèles mathématiques, le comportement futur des sections de chaussées.

Les études du comportement sur des chaussées rigides nécessitent de développer des modèles prévisionnels de la détérioration des chaussées sous l'effet du trafic et des conditions climatiques durant leur vie utile. Dans le modèle HDM-4, il est proposé d'inclure des équations qui traduisent le comportement des chaussées basées sur des analyses statistiques obtenues à partir de données recueillies en chantier. Les modèles sont ainsi développés sur la base des données locales et régionales. Il devient alors nécessaire de développer des procédures de calage aux conditions locales, qui permettront d'ajuster les prédictions émises par ces modèles, assujettis à des conditions différentes. Le calage d'un modèle de détérioration consiste tout simplement à établir des facteurs d'ajustement qui permettent de minimiser l'erreur totale entre le modèle de calage et les données de détérioration observées pour chaque route ou groupe de routes, [1].

Les demandes croissantes pour des techniques de gestion et de planification améliorées, et pour la justification économique des dépenses et des normes dans le secteur de la route, mettent beaucoup plus d'exigences sur les modèles de la détérioration des routes. Le besoin de données fiables et le suivi systématique du réseau a été identifié comme urgent dans l'étude des pays en développement. [2]

La modélisation de la prévision de Détériorations est un élément essentiel dans un système efficace de gestion des chaussées. [3] La planification de l'entretien routier et les activités de développement, la définition des priorités pour la construction, la reconstruction et la réparation des routes, la préparation de l'évaluation économique et la justification de projets sont inévitablement liée à la nécessité de prévoir l'état de la chaussée de la route. A cet effet, les modèles de détérioration de la chaussée sont utilisés, qui sont souvent intégrés dans plusieurs systèmes informatiques complexes. [4] parmi ces modèles, HDM-4 reste le plus performant.

I-1. Modèle HDM-4 :

L'étude ISOHDM (International Study on Highway Development and Management) a été entreprise à partir de 1994 et jusqu'en 2000 pour étendre le domaine d'action du modèle HDM-III et fournir une nouvelle approche des problèmes de gestion des routes, faisant appel à un ensemble de systèmes cohérents, avec des outils logiciels adaptables et conviviaux. Elle a débouché sur la version 1 de l'outil "Développement et Gestion des Routes" HDM-4 parue en 2000. [5]

Le fonctionnement interne de HDM-4 est identique pour une analyse de projet, une analyse de programme ou une analyse de stratégies. Dans tous ces cas, HDM-4 simule l'évolution de l'état et les coûts année par année, tout au long la période d'analyse, en fonction du scénario spécifié par l'utilisateur. Les coûts principaux sont les coûts à l'administration pour l'entretien et l'aménagement du réseau, et les coûts aux usagers pour l'exploitation des véhicules, le temps des passagers et les accidents. Les effets sur l'environnement (émissions des véhicules, consommation d'énergie) sont quantifiés mais non monétarisés. [6]

Il effectue une analyse du comportement des chaussées sur un cycle de vie et calcule :

- La prévision annuelle du comportement des chaussées du réseau routier ;
- Les effets de l'entretien et de l'aménagement des routes ;
- L'analyse coût/avantage de l'utilisation des routes ;
- Des estimations des effets sur l'environnement ;
- Les indicateurs économiques classiques comme le BA (NPV) et le TRI.

HDM-4 est adaptable aux conditions régionales. Il permet d'adopter des données par défaut et des coefficients de calage représentatifs des conditions locales.

I-2. Système de Gestion de l'Entretien Routier (SYGER) :

Le SYGER un outil d'aide à la décision pour la planification stratégique des interventions d'entretien et de réhabilitation des chaussées.

Ce Système permet de :

- connaître l'état du réseau selon des indicateurs de qualité reconnus;
- élaborer une politique d'entretien visant la conservation et la mise en valeur du réseau routier;
- optimiser les interventions d'entretien et de réhabilitation;
- simuler l'effet à long terme de stratégies d'entretien sur l'état des chaussées et les besoins budgétaires en fonction des objectifs de qualité;
- préparer des programmes annuels d'entretien, de conservation et de réhabilitation des chaussées.

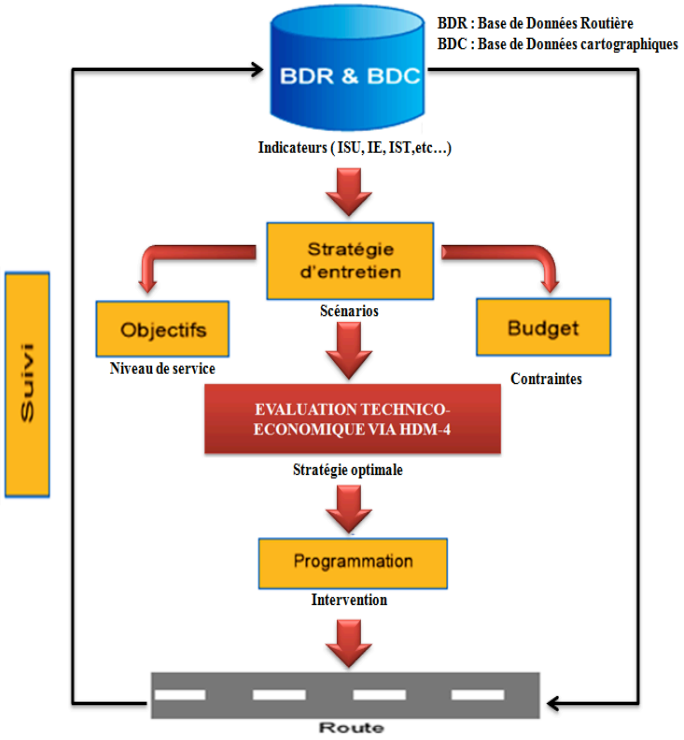

Figure 1 : Système de Gestion de l'Entretien Routier (SYGER) adopté par le CNER

D'après ce schéma illustrant le fonctionnement du SYGER, il apparaît en toute évidence que le passage par le modèle HDM-4 reste une phase cruciale dans le processus de fonctionnement du SYGER, dans le but de produire des études probantes dans un souci d'optimiser l'entretien des chaussées routières afin de compromettre les études technico-économiques qui constitue une préoccupation majeure au sein des administrations chargées de gérer des réseaux routiers.

Dans ce cadre, le calage et l'adaptation du modèle HDM-4 au contexte local, présente un travail substantiel pour pérenniser le SYGER ainsi la résolution des la problématique de l'optimisation de la maintenance du routes.

I-3. Revue bibliographique :

La conception des routes et les normes d'entretien du modèle de la Banque mondiale (HDM) est largement utilisé par les consultants, les organismes de prêt et des ministères des travaux publics, pour étudier les conséquences économiques des investissements dans l'infrastructure routière. La version actuelle du modèle (HDM-4) a été publiée en 2000 et le modèle, ou de ses éléments, ont été utilisés dans des projets identifiés dans 98 pays différents comme il est illustré dans les tableaux suivants :

I-3.1. Etudes de calage faites à l'échelle internationale :

Le tableau suivant résume les études faites dans différents pays du monde et les méthodes adoptées pour l'évaluation des endommagements de leur patrimoine routier.

Country	*Year*	*Affiliation*	*Study title*
Tunisia	1983	DGPC	Expérience Tunisienne du modèle HDM
UK	1986	TRL	Evaluation of the World Bank's Highway Design and Maintenance Standards Model on United Kingdom Highways
Indonesia	1989	CPCA	Modifications to HDM-III for Indonesian Conditions - (Draft Report)
Chile	1991	A. Caroca	Calibration of Asphalt Pavement Behavior Models in Chile - Paper to S.A. ATC Conference
Chile	1991	A. Caroca	Auto Calibration System for the HDM-III Deterioration Models
P.R. China	1991	Yunnan	Adaptation of HDM-III to Yunnan Pavement Management System
Netherlands	1992	**TU** Delft	Validation of Empirical HDM-III Models for Prediction of Asphalt Deterioration by Means of Mechanistic Analysis
P.R. China	1992	Tongji University	Calibration of Vehicle Operating Cost Model for Pavement Management System
Lesotho	1994	VWL	**Pavement Maintenance and Management** System - Calibration of the HDM-III Pavement Performance
South Africa	1994	University of Pretoria	Calibration of HDM-III Performance Models for use in the pavement management of South African National Roads
South Africa	1994	VWL	Calibration of the HDM-III Pavement Performance Models for use in the Ciskei Region of the Eastern Cape Province
South Africa	1994	VWL	Calibration of the HDM-Il I Pavement Performance Models for use by the Transvaal Provincial Authority
Hungary	1995	TSA	Presentation of Input Data for HDM-III Run in 1994
India	1997	ND lea International Limited Vancouver Canada-Lea Associates South Asia Pvt Ltd New Delhi India	Calibration of Road User Effects Model
Queensland	1998	ARRB	HDM-4 ISOHDM Structured Testing for Chip-Sealed Granular Pavements - RD Models Initial CALIBRATION : HDM-4 (V2.06), versus HDM-III (QDMR) and the ARRB Model
Australia	1999	ARRB	HDM-4 Model Testing for Selected Australian Conditions : Road Deterioration Models for Chip-Sealed Granular Pavements- CALIBRATION STUDY
Thailand	1999	Montgomery Waston Harza (NZ) Ltd	Case study- Calibration of HDM-4 to Thailand

Estonia	2001	ENRA-TCER	Short HDM-4 Calibration Guide for Strategy Analysis in Estonia
South Africa	2002	ATD-DPWRT	The Calibration and validation of HDM performance models in the GAUTENG PMS
lithuanian	2002	Vilnius Gediminas Technical University	Adaptation of Pavement Deterioration Models To Lithuanian Automobile Roads
Chile	2003	Ponificia Universidad Catolica de Chile-P.U Javeriana de Colombia	Calibration of Performance Models for Surface Treatment to the Chilean conditions The HDM-4 cas
New Zealand	2006	Land Transport New Zealand	A review of the HDM/dTIMS Pavement models based on calibration site data
Korea	2012	Osaka, Kyoto and Hanbat National University	Section-based Multifunctional Calibration Method for PD Forecasting Model

I-3-2 Etudes relative au calage du modèle HDM au contexte Marocain :

Au Maroc, le CNER a acquis une expérience pour ce qui concerne l'utilisation du Modèle HDM-4 qui est imposé par la Banque Mondiale pour l'évaluation économique des projets soumis au financement comme il est indiqué dans le tableau au-dessous :

Country	*Année*	*affiliation*	*Titre de l'étude*
Morocco	1988	Transroute	Mise à disposition d'experts en système de gestion de chaussées, CNER - Direction des Routes et de la Circulation Routière.
Morocco	1989	DAR	National Transport Study.
Morocco	1990	DAR	Kenitra Larache Toll Motorway.
Morocco	1990	Louis Berger	Experts Services for Equipment Ministry.
Morocco	1992	BCEOM	Elargissement des Routes Etroites.
Morocco	1993	CID	6ème Project Routier complément du Programme Des Routes a Elargir.
Morocco	1994	DAR	Rabat Fez Toll Motorway.

II- Calage du modèle de la fissuration transversale

Les modèles de prévision de la détérioration et les effets de travaux des chaussées en béton ont été inclus dans la première version du logiciel HDM-4 ont été basées sur le travail de l'équipe d'étude en Amérique latine (LAST) et rapportés dans LAST (1996). Cette étude a attiré en grande partie sur la recherche aux Etats-Unis, qui a utilisé les données à partir de la banque de données LTPP et les modèles sont pour la plupart tirées d'un rapport de

FHWA par ERES Consultants (ERES, 1995). À l'exception du modèle de la fissuration transversale de chaussée de type J.P, les modèles sont entièrement empiriques et tous ont été rapportés en unités impériales [7].

Le calage du modèle de la fissuration transversale nécessite une base de données adéquate pour pouvoir déterminer les valeurs prédites de cette fissuration. Plusieurs considérations sont prises en compte pour effectuer le calage, [8]. Au départ, on a procédé à l'étude du calage par une régression linéaire simple avec une ordonnée nulle à l'origine. Les variables indépendantes ainsi considérées sont les valeurs observées à partir d'important historique de données disponibles au CNER (Centre National d'Etudes et de Recherches Routières au Maroc). Par la suite, on procède à l'élimination des valeurs aberrantes (s'écartant visiblement de la droite de régression) afin d'avoir un coefficient de détermination ajusté plus élevé se rapprochant de l'unité. Par la suite, on détermine la pente de la droite de régression qui représente le coefficient du calage recherché à partir de la courbe de tendance illustré sur le graphe de distribution des valeurs au tour de la droite de prévision.

Concernant les observations relatives au pourcentage des dalles fissurées transversalement, on dispose d'une taille d'échantillonnage suffisante extraite des relevés réalisés par le CNER, depuis la construction de la route en 1990. Sur le tableau 1 on montre les statistiques descriptives des valeurs observées de la fissuration transversale sur 23 ans, moyennant un pas de temps non régulier. Les résultats montrent qu'en moyenne, il y a apparition de 20% de fissuration transversale dans les dalles de béton.

Tableau 1 : Statistiques descriptives des valeurs observées.

Moyenne	19,651
Erreur-type	2,885
Médiane	5,327
Mode	0
Écart-type	27,372
Minimum	0
Maximum	90
Nombre d'échantillons	90

Variation du facteur de calage K

Sur le tableau 2 on présente les résultats de régression linéaire simple relative à trois types de série de données expérimentales. Les séries N°1, N°2 et N°3 des valeurs concernent des tailles d'échantillon respectives de 90 ; 79 et 76 nombres de couples de valeurs calculées et mesurées. Pour la série N°1 d'une taille d'échantillon de 90 couples, les résultats trouvés montrent que le coefficient de calage K est égal à 0.641 calculé pour un coefficient de régression 0.732 et moyennant une erreur type du résidus de 10%, figure (1). Ces résultats affirment la fiabilité du modèle utilisé pour simuler la fissuration transversale détectée sur la chaussée de béton d'une route construite il y a 23 ans.

Tableau 2 : Résultat de la régression simple pour trois séries de mesure

Taille d'échantillon (nombre de couples)	Type de série des mesures	Erreur type de résidus (APE %)	Coefficient de détermination ajusté R^2	Coefficient de calage K
90	1	10.363	0.732	0.641
79	2	5.956	0.845	0.672
76	3	3.167	0.943	0.756

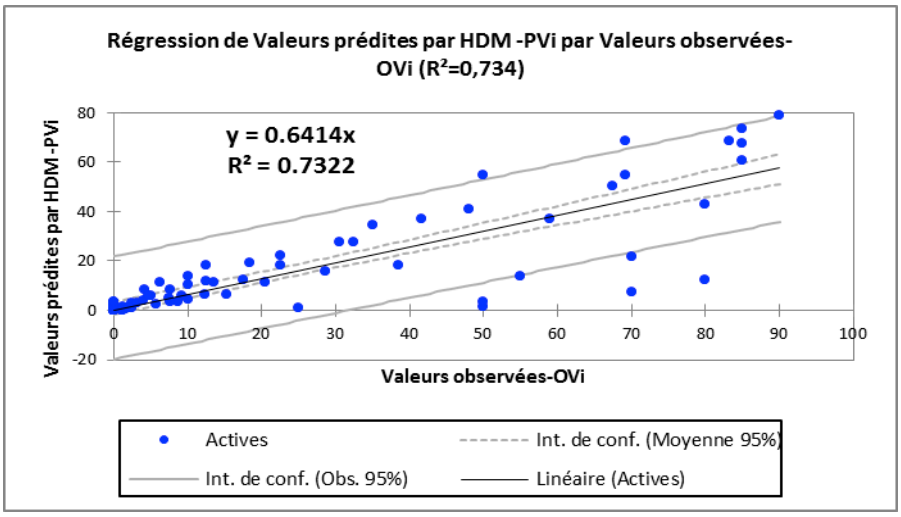

Figure 1 : Distribution des points avec la droite de prévision minimisant la somme des carrées des écarts des couples (PVi ; OVi) à la droite de la série des données N°1.

En réduisant la taille d'échantillon à 79 (cas de la série N°2), les résultats de la figure 2 affirment une nette amélioration du coefficient de calage entre le modèle proposé et les résultats de mesure. En Fait, ce coefficient passe de 0.732 à 0.845 soit une amélioration de calage de 16% quoique le nombre de couples éliminés n'ait pas dépassé plus de 12%. On assiste aussi à une nette dégression du pourcentage de l'erreur type du résidu de l'ordre de 42%.

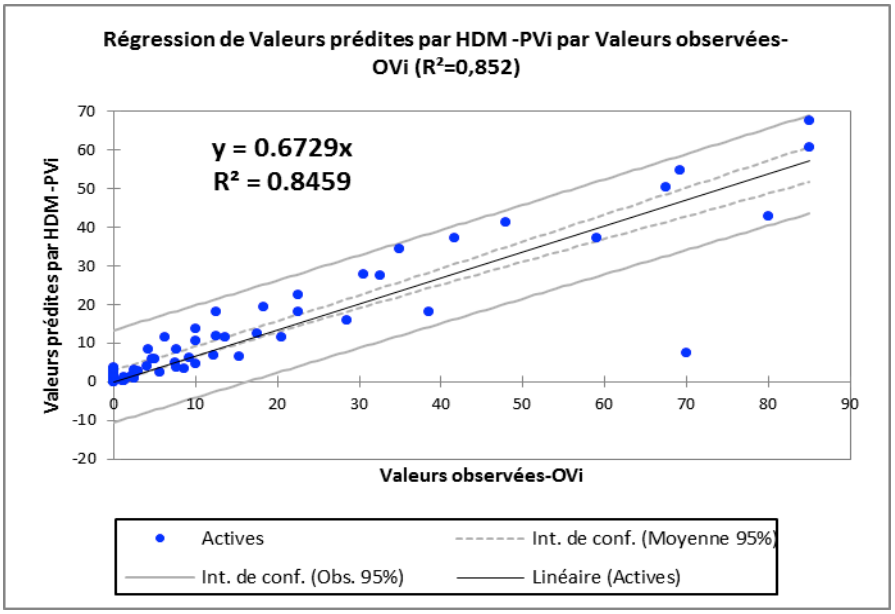

Figure 2 : Distribution des points avec la droite de prévision minimisant la somme des carrées des écarts des couples (PVi ; OVi) à la droite de la série des données N°2.

En diminuant davantage la taille d'échantillon à 76 (cas de la série N°3), les résultats de la figure 3 affirment une amélioration encore plus nette du coefficient de calage entre le modèle proposé et les résultats de mesure en comparaison avec les autres séries de mesures. En Fait, ce coefficient passe de 0.845 à 0.934 soit une amélioration de calage de 10% quoique le nombre de couple éliminé n'ait pas dépassé plus de 3%. On assiste aussi à une nette dégression du pourcentage de l'erreur type du résidu de l'ordre de 69% par rapport à la première série et de 47% par rapport à la série N°2.

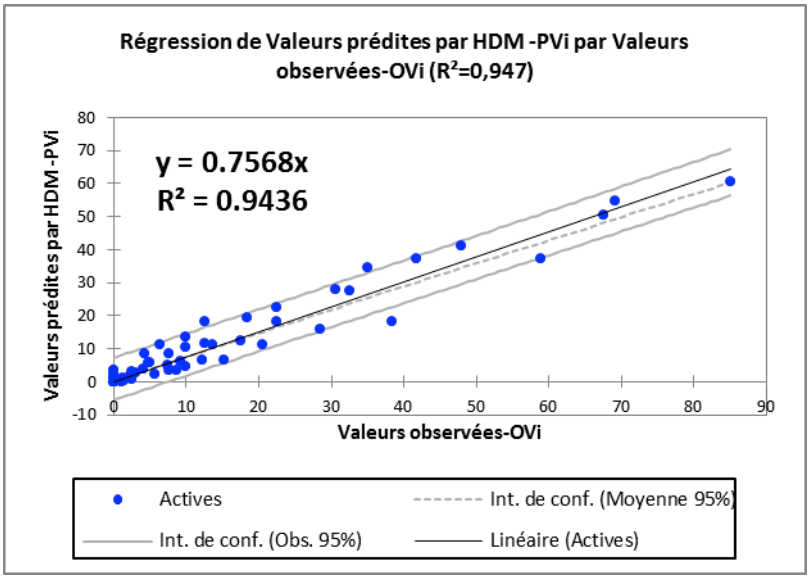

Figure 3 : Distribution des points avec la droite de prévision minimisant la somme des carrées des écarts des couples (PVi ; OVi) à la droite de la série des données n°1.

Ce modèle pourra être utilisé par les décideurs et les services d'entretien pour prévoir le degré de dégradation d'une chaussée moyennant les paramètres moyens liés à la nature du béton, du trafic routier et des conditions climatiques (pluie ; température ; neige etc…). Sur le tableau 3, on montre les valeurs moyennes des coefficients de calage établies sur les trois types de séries de données.

Tableau 3 : Facteurs K et erreurs types de résidus moyens correspondant aux séries de couples étudiées.

Nom de série	Taille d'échantillon	APE (%)	Coefficient de calage K
Série N°1	90	10.363	0.641
Série N°2	79	5.956	0.672
Série N°3	76	3.167	0.756
Moyenne		6.584	0.689

Il ressort du tableau 3 que le coefficient K de la série N°3 est celui qui possède la plus petite erreur type des résidus, en deçà de celle associée à la moyenne des trois séries.
L'équipe de développement de la méthodologie de calage recommande d'utiliser la valeur de l'erreur type des résidus pour sélectionner le coefficient de calage. Mais la dispersion des valeurs des couples (PVi ;OVi) de la troisième série montre que l'ajustement entre les valeurs observées (axe des abscisses) et les valeurs prédites (axe des ordonnées), avec un coefficient K = 0,75. Cet ajustement montre que les valeurs observées sont plus grandes que les valeurs prédites. Si on veut que la prédiction du modèle HDM-4 soit conforme à l'observation, il convient d'augmenter la prédiction de HDM-4, et donc d'introduire dans le modèle un facteur de calage supérieur à 1. Dans ce cas précis, le facteur qui convient est la normalisation du coefficient trouvé par rapport à l'unité (K=1/0.7568=1.3). Par conséquent, nous adoptons le coefficient de calage du modèle de la fissuration transversale K = 1.3 de la troisième série.

III- Calage du modèle de l'épaufrure des joints transversaux

Dans cette section de résultats, on procède de la même façon dans le but de cerner la variation du facteur de calage de ce modèle en déterminant des facteurs d'ajustement qui permettent de minimiser l'erreur totale entre le modèle calé et les données de détérioration observées. Il suffit de déterminer le coefficient du modèle de régression avec une ordonnée nulle à l'origine, où les variables indépendantes, observées de ce défaut et dépendantes sont celles prédites par le modèle HDM-4. Sur le tableau 5, on présente les statistiques descriptives pour les valeurs observées de l'épaufrure des joints transversaux.

Tableau 4 : Statistiques descriptives des valeurs observées.

Moyenne	1,415
Erreur-type	0,215
Médiane	0
Mode	0
Écart-type	2,040
Minimum	0
Maximum	5
Nombre d'échantillons	90

Sur le tableau 5 on présente les résultats relatifs aux calculs des facteurs K et des erreurs types du résidu avec le coefficient de détermination correspondant à quatre types de série de données expérimentales. Les séries N°1, N°2, N°3 et N°4 des valeurs concernent des tailles d'échantillon respectives de 90 ; 77, 68 et 64 nombres de couples de valeurs calculées et mesurées. Pour toute les séries utilisées, le coefficient K dépasse la valeur 1 et ce conformément aux recommandations formulées par la première étude du calage de la fissuration transversale. Globalement, le résidu choisi comme critère de sélection de K diminue avec la taille de la série adoptée. Cependant, le coefficient K est pratiquement insensible à la variation de la taille de la série de mesure ce qui nous amène à penser de la robustesse du modèle utilisé. En guise des résultats trouvés, il ressort que le coefficient K de la série N°4 est celui qui possède la plus petite erreur type des résidus, en delà de celle associée à la moyenne des trois séries. Par conséquent, nous adoptons le coefficient de calage du modèle de l'épaufrure des joints transversaux K = 1 de la quatrième série, puisqu'elle présente la valeur APE la plus faible.

Tableau 5 : Facteurs K et erreurs types de résidus relatifs aux séries de couples étudiées.

Nom de série	Taille d'échantillon	APE (%)	Coefficient de calage K
Série N°1	90	2.992	1.001
Série N°2	77	0.215	1.014
Série N°3	68	0.135	1.012
Série N°4	64	0.089	1.007
Moyenne	-	0.857	1.0085

IV- Calage du modèle de l'uni

Afin de procéder au calage de ce modèle, il est semble nécessaire en premier lieu de prédire les valeurs correspondantes de la fissuration et de l'épaufrure des dalles. Ensuite, on procédera au calcul des coefficients de calage relatif à l'uni. En effet, le modèle proposé dans la méthodologie HDM-4 fait intervenir trois types de dégradation pour prédire l'uni sur la base d'une valeur observée de l'uni. Le modèle revêt la forme suivante, [3, 4] :

$$IRI = IRI0 + 2.0698 \times TFAULT + 1.8407 \times SPALL + 2.282\ 10^{-6} \times TCRACK^{3}$$

Concernant les observations de l'uni, les bases de données du CNER, pour la section d'El Gara sur la RP3606, comportent uniquement des valeurs pour les années 1995, 2001, 2009 et 2011. Pour ne pas avoir une ambiguïté dans les unités adoptées par le modèle HDM-4, on procède à la conversion des valeurs observées en pouce par mile au lieu de m/Km et ce dans le but de calculer la valeur de l'uni selon la formule précédente.

Tableau 6 : Statistiques descriptives des valeurs observées de l'uni.

Valeurs observées-OVi	(po/mi)
Moyenne	597,60
Erreur-type	8,73
Médiane	612,06
Mode	569,61
Écart-type	44,53
Minimum	525,89
Maximum	663,19
Nombre d'échantillons	26

Dans un premier temps, les valeurs prédites des pourcentages de dalles fissurées et des détériorations des joints ont été calculées suivant leur modèle calé respectif de HDM-4 et par la suite, ces valeurs ont été multipliées par leurs facteurs K respectifs présentés précédemment, (tableaux correspondants). Dans un second temps, une fois les valeurs prédites de l'uni établies et le calcul de l'uni initial IRI_0 effectué, les calculs des différents facteurs K et leur APE associés ont été effectués. Les résultats présentés dans le tableau 7 concernent cinq séries de mesure de taille d'échantillon variant de 80 couples à 26 couples.

Tableau 7 : Facteurs K et erreurs types de résidus relatifs aux séries de couples étudiées.

Nom de série	Taille d'échantillon	APE (%)	Coefficient de calage K
Série N°1	80	30,67	0,93
Série N°2	54	25,03	0,95
Série N°3	38	19	0,93
Série N°4	30	15,75	0,93
Série N°5	26	13,3	0,93
Moyenne		20,75	0,934

En se référant aux résultats du tableau 7, il ressort que le coefficient K de la série N°5 est celui qui possède la plus petite erreur type des résidus (critère de sélection) en delà de celle associée à la moyenne des Cinq séries. Cependant, on constate que le coefficient K reste presque constant avec une erreur type qui diminue progressivement, alors on adopte un coefficient qui vaut 0.93 (le plus proche de 1, coefficient unitaire pris par défaut dans le modèle HDM-4) par rapport aux autres séries, même si la dispersion est un peu forte. En effet, quand on adopte beaucoup de points de mesure, il est recommandé de ne pas trop s'éloigner des valeurs prises par défaut de HDM-4. Par conséquent, on adopte un coefficient de calage du modèle de l'uni, K égal à **0.93**.

V- Interprétation complémentaire et analyse des résultats de calage

V-1 Modèle de la fissuration transversale

La méthodologie de calcul des différentes composantes entrant dans l'utilisation et le calage de ce modèle est complexe et nécessite une quantité appréciable de données. En particulier, le modèle requiert l'établissement d'un histogramme de température dans les dalles. Le calage effectué utilise les valeurs fournies par HDM-4. Le facteur de calage K retenu pour ce modèle est égal à 1.3. Ce facteur est a priori plus au moins correct, quoique peu élevé, et indique que le modèle non calé surestime la fissuration transversale.

V-2 Modèle de l'épaufrure des joints transversaux

Le facteur de calage K retenu pour ce modèle est K=1, et sa valeur des erreurs types des résidus (APE) est de 0.089. L'étude de calage pour ce modèle a été effectuée par une régression linéaire simple avec une ordonnée nulle à l'origine. Les résultats du calage obtenus semblent valables.

V-3 Modèle de l'uni

Il est important de signaler que la procédure de calage pour le modèle de l'uni est séquentielle. Les prédictions de l'uni au sein du modèle HDM-4 sont tributaires des prédictions des dénivellations, des fissurations et des pourcentages d'épaufrure. Le facteur de calage K retenu pour ce modèle est 0.93, et sa valeur des erreurs types des résidus (APE) est de 13.30.

VI- Conclusion

Une étude de variation du facteur de calage a été réalisée à l'aide de la méthode des moindres carrées (régression linéaire simple). Cette méthode aide à l'étude de la qualité du facteur de calage en choisissant le meilleur facteur des différents couples de valeurs prédites et observées en se référant à la faible erreur du résidu (choisie comme valeur de prédiction fiable). A l'aide de données fournies par le Centre National d'Etudes et de Recherches Routières CNER, des calages des modèles de la fissuration transversale des dalles, l'épaufrure des joints transversaux et l'uni de la chaussée de la section expérimentale El Gara sur la RP3606 ont été effectués selon les recommandations des concepteurs du modèle HDM-4. Les bénéfices qui découlent de la réalisation de cette étude de recherche appliquée sont significatifs quoique difficilement quantifiables avec précision en terme d'économie nette. Cette étude semble importante pour les décideurs dans l'implantation d'un système de gestion des chaussées.

Références

[1] Chaouki Abou-Rjaili, Développement et calage des modèles de comportement du réseau de chaussées rigides du MTQ, Ph-D, Ecole de Technologie Supérieure Université du Québec, Montréal Novembre 1999.

[2] Paterson W.D.O, (1990), Road Deterioration and Maintenance Effects: Models for Planning and Management, The Johns Hopkins University Press, Baltimore and London, 2 P.

[3] Daeseok Han, Kiyoshi Kobayashi, and Myungsik Do, (2013), Section-based multifunctional calibration method for pavement deterioration forecasting model, KSCE Journal of Civil Engineering, 7(2): 386-394

[4] Aivaras Braga, Donatas Cygas, (2002), Adaptation of pavement deterioration models to lithuanian automobile roads, Journal of civil engineering and management, Vol VIII. No 3, 214-220.

[5] Henry G. R. Kerali . J.B. Odoki and Eric E. Stannard, 2000. Série développement et gestion des routes Vol. 1-Traduction en langue française effectuée par JOUBERT Pierre : Vue d'ensemble de HDM-4 Version2.0, World Road Association (PIARC), Paris, France.

[6] Greg Morosiuk. Mike Riley and Tyrone Toole, 2000. Série développement et gestion des routes Vol. 2-Traduction en langue française effectuée par JOUBERT Pierre: Guide des applications de HDM-4 Version 2.0, World Road Association (PIARC), Paris, France.

[7] Greg Morosiuk. Mike J Riley and J.B. Odoki, 2000. The highway development and management series Vol.6: Modelling road deterioration and works effects, Version 2, World Road Association (PIARC), Paris, France.

[8] Bannour Abdelilah, Etude technico économique des chaussée en béton de ciment via le modèle HDM-4, section El gara province de Settat sur la RP3606. Rapport de Master spécialisé en ICP BTP, Faculté des Sciences Semlalia Marrakech, Université Cadi Ayyad, Juillet 2013.