

ADAPTATION DU HDM-4 AUX AUTOROUTES JAPONAISES

K. OKUBO

Section technique, Japan Highway Public Corporation (JH), Japon
Katsumi_Ookubo@jhnet.go.jp

M. SATO

Centre d'expérimentation et de recherche, Japan Highway Public Corporation (JH), Japon
Masakazu_Satou@jhnet.go.jp

J. XING

Section de recherches techniques sur les routes, Expressway Technology Center, Japon
J_xing@extec.or.jp

RESUME

Cette thèse concerne le calibrage des modèles HDM-4 pour leur adaptation aux autoroutes japonaises. Elle se concentre sur l'analyse du calibrage des modèles de profondeur des ornières HDM-4, des effets sur les usagers des routes et des effets socio-environnementaux sur la base des données des autoroutes japonaises et des données automobiles, socio-économiques et environnementales. Après le calibrage adapté, il s'est révélé que les modèles HDM-4 à la fois pour les effets sur les utilisateurs des routes et les effets environnementaux donnaient une représentation satisfaisante des données d'observation au Japon. Le modèle de profondeur d'ornière a également donné un résultat acceptable, mais il a été observé qu'une validation plus poussée du modèle était nécessaire pour améliorer sa précision de prédiction. Le HDM-4 a aussi été appliqué à l'étude du critère de gestion des ornières pour les réparations sur les autoroutes. Le critère de gestion optimal des ornières pour réduire le coût du cycle de vie prévu par le HDM-4 correspondait pratiquement au critère de gestion des ornières actuel. Les études à venir devraient inclure l'application du modèle HDM-4 à la recherche sur l'ensemble du réseau routier et à des questions concernant la politique du trafic routier.

MOTS-CLES

HDM-4 / PAVAGE / FRAIS DES USAGERS DES ROUTES / MAINTENANCE / ANALYSE DU COUT DU CYCLE DE VIE (LCC)

1. LES AUTOROUTES JAPONAISES ET LA MAINTENANCE DU PAVAGE

La Japan Highway Public Corporation (JH), qui effectue, au lieu du gouvernement national, la synthèse des organisations nationales s'occupant de la construction et de la gestion des routes à péage, et en particulier des autoroutes, a été fondée en avril 1956 pour promouvoir la construction des routes et une bonne circulation. La loi sur les routes principales de développement du territoire prévoit l'aménagement de 11.520 km d'autoroutes, et depuis l'ouverture de l'autoroute Meishin en juillet 1963 (71 km), la première autoroute japonaise, 7.112 km ont été ouverts à la circulation jusqu'en janvier 2003.

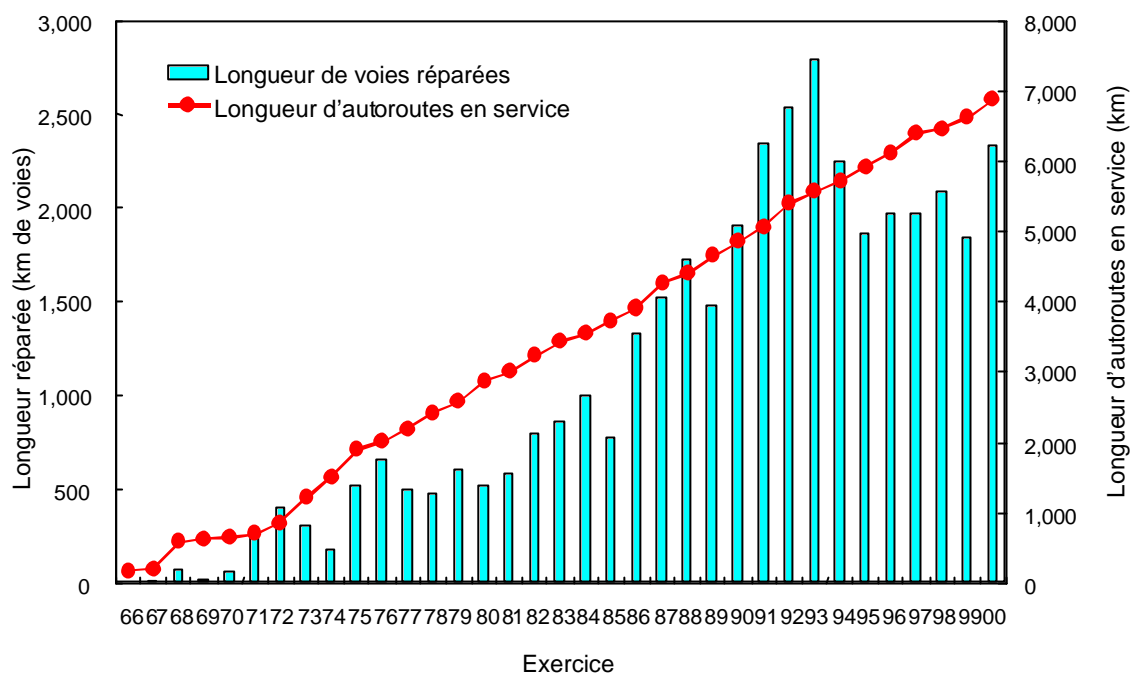


Figure 1 - Evolution de la longueur des pavages réparés

Actuellement, 4,02 millions de véhicules circulent en moyenne par jour sur les autoroutes de tout le pays, soit 40% du volume de transport de toutes les routes, ce qui fait d'elles des infrastructures indispensables aux activités économiques et à la vie quotidienne. Par ailleurs, nous sommes véritablement entrés dans une période de maintenance, avec un volume d'autoroutes dégradées en service depuis plus de 30 ans atteignant environ 900 km, et la maintenance adaptée est exécutée pour assurer la sécurité en conduite à grande vitesse et la fonctionnalité du réseau de routes principales; le public demande plus une maintenance efficace des autoroutes qu'une nouvelle réduction de ces frais de gestion.

Il en va de même pour la réfection de la chaussée des autoroutes; comme le montre le Figure 1, la longueur des voies où des réfections de la chaussée sont exécutées suite à la dégradation augmente avec le prolongement des autoroutes ouvertes. Les causes sont principalement les ornières dues à l'usure et/ou au fluage, mais depuis quelques années, les mesures contre les ornières s'avèrent efficaces, et les réfections de chaussée suite à des fissures constituent maintenant environ 40% du total.

Visant l'optimisation du cycle de vie pour la maintenance des routes pavées, la JH effectue des études sur les matériaux comme les matériaux de pavage et leur dosage, et sur les procédés, comme les méthodes de gestion des routes.

Dans ce cadre, le logiciel HDM-4 développé par l'ISOHDM, centré sur le PIARC et la Banque Mondiale, étant un outil permettant une analyse économique à partir de la performance des routes pavées, elle a vérifié son applicabilité comme outil PMS (système de gestion des pavages) pour le pavage des autoroutes.

2. ABREGE DU CALIBRAGE DE HDM-4

Dans cette étude, des activités pour l'amélioration de la qualité des données saisies et le calibrage des sorties ont été faites conformément au manuel de calibrage du HDM-4 (Bennet et al., 2001) en vue de l'application de HDM-4 aux autoroutes japonaises.

Les données et modèles objets du calibrage sont comme suit.

- Collecte de données de base (particularités du trafic, particularités de la structure de la route, types de véhicules et leurs particularités, conditions climatiques etc.)
- Modèle de dégradation du pavage/activités de réfection
- Modèle de frais des usagers des routes
- Modèle d'accident de la circulation/émissions

Sur le thème de base qu'est la composition par type de véhicule, nous avons effectué un classement en 8 types de véhicules en nous rapportant à la composition par type de véhicule recommandée dans le manuel HDM-4, et en tenant compte globalement de l'effet d'endommagement du pavage et des frais des usagers des routes, des frais socio-environnementaux, de la composition par type de véhicule payant le péage, de la composition par type de véhicule prévue pour le trafic sur les autoroutes etc. Mais la division par type de véhicule a été réduite sur la base des données collectées pour le calibrage.

- Voitures de tourisme
- Camionnettes (essence)
- Camionnettes (Diesel)
- Camions moyens
- Autobus moyens
- Grands camions
- Grands autobus
- Remorque

3. CALIBRAGE DU MODELE DE DEGRADATION DU PAVAGE

3.1. Modèle d'ornièrre du HDM-4

Les modèles d'ornièrre estimés dans HDM-4 sont divisés en 4: (1) consolidation suite à la mise en service initiale (RDO), (2), déformation structurelle incluant la déformation sous la chaussée (RDST), (3) déformation plastique de la couche d'asphalte (RDPD) et (4) usure due aux pneus cloutés (RDW). Comme les pneus cloutés sont interdits au Japon, les modèles provoquant les ornièrres seront comme suit (Odoki et al., 2001).

$$RDM = RDO + RDST + RDPD$$

où:

- RDM: Augmentation incrémentale des ornières (mm)
 $RDO = Krid [a0 (YE4 \cdot 10^6)^{a1 + a2 \cdot DEF} \cdot SNP^{a3} \cdot COMP^{a4}]$
 $RDST = Krst (a0 \cdot SNP^{a1} \cdot YE4^{a2} \cdot COMP^{a3})$
 $RDPD = Krpd \cdot CDS^3 \cdot a0 \cdot YE4 \cdot Sh^{a1} \cdot HS^{a2}$
 SNP: Indice d'épaisseur du pavage ajusté
 DEF: Déflexion annuelle moyenne par la poutre de Benkelman (mm)
 COMP: Compactage relatif chaussée – fondation (%)
 CDS: Indice de qualité d'exécution de la couche de surface d'asphalte
 HS: Epaisseur de la couche de surface d'asphalte, couche de base (mm)
 YE4: Nombre annuel d'essieux standard équivalents (charge d'essieu standard: essieu unique pneu simple 6,60 t, essieu unique double pneu: 8,16 t etc.)
 Sh: Vitesse de déplacement d'un grand véhicule (km/h)
 ai: Paramètre de modèle
 Ki: Facteur de calibrage

La progression annuelle des ornières est $RDO + RDPD$ dans le cas de moins d'un an après une nouvelle construction ou une réfection incluant la fondation. Dans les autres cas (plus d'un an après une nouvelle construction ou une réfection incluant la fondation), elle est $RDST + RDPD$.

3.2. Section objet du calibrage

Dans cette étude, les conditions de sélection des routes et tronçons concernés sont comme suit. Le Tableau 1 montre la longueur et le nombre de tronçons de la zone concernée extraits sur la base de ces critères.

- Tronçons à travaux de terrassement, à enrobé dense, et à pavage d'asphalte poreux
- Tronçons à trafic important et développement relativement important des ornières
- Tronçons sans réfection, ou dont la date de réfection est connue
- Concerne seulement la première voie
- Classement en zones ordinaires, d'usure, à quasi-usure, compte tenu d'influence du climat
 - Zones d'usure: Zones où l'usure due aux chaînes en hiver etc. est important
 - Zones à quasi-usure: Zones d'usure en hiver et fluage en été
 - Zones ordinaires: Zones où le fluage domine
- La fréquence de mesure en fonction du développement des ornières est de 1 à 3 ans.

Tableau 1 - Zones d'ornières extraites pour le calibrage

Type de pavage	Type de zone	Longueur (km)	Nombre de tronçons
Enrobé dense	Zone ordinaire	544.6	43
	Zone de quasi-usure	318.8	27
	Zone d'usure	72.8	6
Asphalte poreux ¹	Zone ordinaire	10.4	31
	Zone de quasi-usure	7.9	23

Note: 1) Il n'y a pas de zones d'usure dans les données d'ornières des pavages fonctionnels collectées.

3.3. Résultats du calibrage

Les ornières de l'année première de mise en service et les ornières qui se sont développées les années suivantes ont été estimées séparément comme suit avec HDM-4.

La première année de mise en service: $RDM = RDO + RDPD$

Les années suivantes: $RDM = RDST + RDPD$

Tableau 2 - Résultats du calibrage du modèle de développement des ornières HDM-4

Type de pavage	Type de zone	RDO Krid	RDST Krst	RDPD Krpd	Nombre de données		R
					L'année de mise en service	Les années suivantes	
Enrobé dense	Zone ordinaire	3.21	4.78	0.44	39	166	0.94
	Zone de quasi-usure	3.37	14.00	-1.97	26	143	0.87
	Zone d'usure	3.57	-0.13	18.54	9	27	0.96
Asphalte poreux	Zone ordinaire	2.63	8.76	0.03	37	84	0.65
	Zone de quasi-usure	3.33	16.94	0.03	25	66	0.68

Le Tableau 2 indique le facteur de calibrage du modèle de développement des ornières de HDM-4 obtenu par analyse de régression. La Figure 2 montre la corrélation entre les valeurs d'observation du développement des ornières et les valeurs estimées de HDM-4.

Si l'on considère l'ensemble des ornières de l'année de mise en service et des années suivantes, le facteur de corrélation est élevé, mais vu séparément, la corrélation individuelle est faible. Cela permet donc de dire qu'actuellement le modèle de développement des ornières de HDM-4 n'explique pas bien les valeurs réelles de développement des ornières. Il y a aussi des résultats irréalistes; Krpd et Krst sont négatifs respectivement dans la zone de quasi-usure et la zone d'usure, autrement dit si le trafic augmente, l'augmentation des ornières par déformation plastique de la couche d'asphalte diminue. Le développement des ornières mesuré diffère considérablement selon les conditions d'exécution et des conditions climatiques minimales etc. pour une même route ou un même pavage.

4. CALIBRAGE DU MODELE DE FRAIS DES USAGERS DES ROUTES

4.1. Abrégé du calibrage

Le calibrage du modèle de frais des usagers des routes comprend le classement des données saisies dans chaque modèle et le calibrage des sorties dans chaque modèle. Dans cette étude, les données de particularités des véhicules ont été classées sur la base des données collectées, conformément au manuel de calibrage de HDM-4, et après comparaison des résultats des essais HDM-4 aux frais réels des utilisateurs des routes au Japon, le calibrage de modèles internes du HDM-4 a encore été effectué pour les items pour lesquels il y a une grande différence entre les résultats calculés et les valeurs réelles. La Figure 3 donne la procédure de calibrage du modèle de frais des usagers des routes. Voici ci-dessous l'abrégé du calibrage du modèle de frais des usagers des routes.

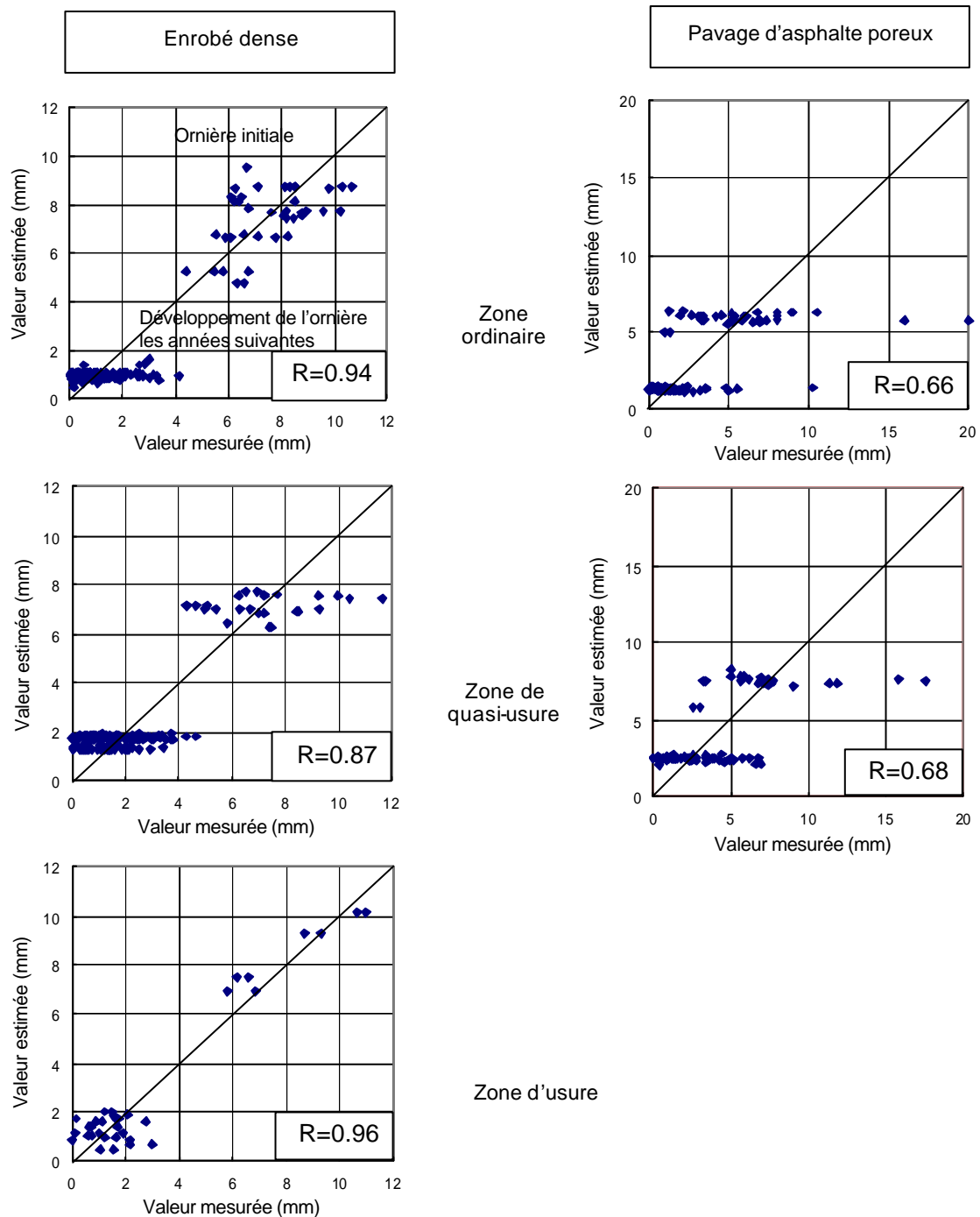


Figure 2 - Comparaison entre les valeurs mesurées de développement des ornières et des valeurs estimées du modèle HDM-4

4.2. Collecte et classement des données de base

Les données de base sont principalement des types suivants.

- Particularités matérielles des véhicules (dimensions, nombre de roues, nombre d'essieux, facteur de conversion pour petits véhicules, poids en déplacement, nombre d'essieux en conversion standard, particularités des pneus etc.)
- Particularités d'utilisation des véhicules (distance annuelle moyenne parcourue, temps de déplacement, vie de service moyenne, pourcentage de véhicules domestiques, nombre moyens de personnes d'équipage etc.)

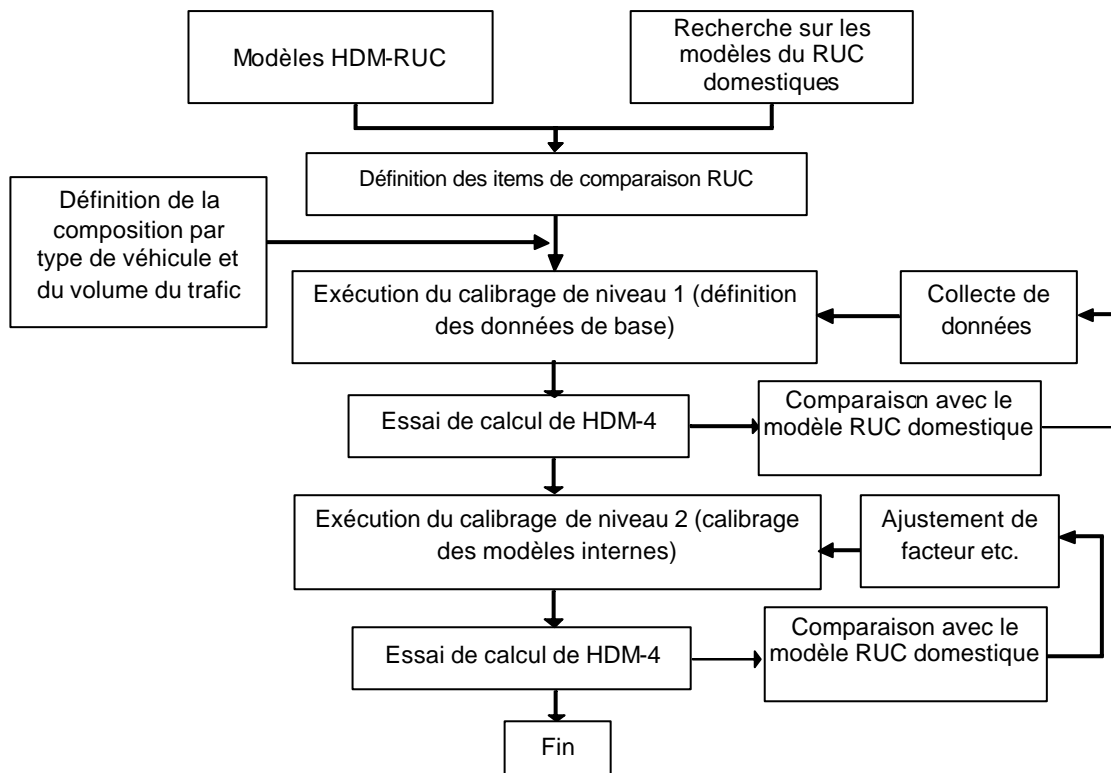


Figure 3 - Procédure du calibrage pour les frais des usagers des routes

- Ressources de véhicules (prix du véhicule neuf, prix des pneus, frais de carburant, frais d'huile, frais indirects annuels, salaire de l'équipage etc.)
- Données de valeur horaire (valeur horaire des voyageurs d'affaires, valeur horaire des voyageurs non-affaires, valeur horaire des marchandises etc.)

Dans cette étude, les données publiées par divers organismes comme les constructeurs automobiles, les associations en relation avec l'automobile, le Ministère du Territoire et des Transports (MLIT) etc., ainsi que les données de base diverses ci-dessus concernant les types de véhicules obtenues sur enquêtes ont été classées en tant que calibrage de niveau 1.

Les données de base par type de véhicule classées ont été saisies dans HDM-4, et un essai d'application de HDM-4 a été fait pour 10 km d'autoroute.

Les résultats de ce calcul ont été comparés aux frais des usagers des routes japonaises (frais de déplacement des véhicules par item et frais horaires), et aux frais d'entretien du véhicule des camions et autobus et aux frais de carburant des véhicules autres que les autobus sont apparus en tant qu'items pour lesquels il y a une très grande différence entre le calcul et les valeurs réelles. Ensuite, le calibrage du modèle interne des frais d'entretien du véhicule et des frais de carburant a été effectué comme calibrage de niveau 2.

4.3. Calibrage du modèle de frais d'entretien du véhicule

Dans HDM-4, les frais d'entretien du véhicule comprennent les frais de consommation de pièces du véhicule et les frais concernant le temps d'entretien du véhicule (Odoki et al.,

2001).

Les frais de pièces du véhicule sont:

$$PC_{kp} = K0pc * [CKM^{KP} * (a0 + a1 * RI_{adj}) + K1pc] (1 + CPCON_k * dFUEL_{kp})$$

où:

PC_{kp} : Volume de pièces utilisées par 1000 km indiqué en tant que rapport au prix d'achat neuf

CKM: Nombre total moyen de km parcourus par le type de véhicule k (km)

KP: Facteur du nombre d'années d'utilisation du véhicule

RI_{adj} : Uni modifié de la chaussée (IRI m/km)

$CPCON_k$: Facteur d'augmentation d'utilisation de pièces avec le changement de vitesse (valeur par défaut: 0,10)

$dFUEL_{kp}$: Facteur d'augmentation de la consommation de carburant avec l'augmentation/diminution de la vitesse

$a0, a1$: Paramètre de modèle

$K0pc, K1pc$: Facteur de calibrage (valeur par défaut: $K0pc = 1.0, K1pc = 0$)

Temps d'entretien du véhicule:

$$LH_{kp} = K0lh * [a0 * PC_{kp}^{a1}] + K1lh$$

où:

LH_{kp} : Temps d'entretien par 1000 vé-km du véhicule de type k au niveau de trafic p

$a0, a1$: Paramètre de modèle

$K0lh, K1lh$: Facteur de calibrage (valeur par défaut: $K0lh = 1.0, K1lh = 0$)

Les données de frais d'entretien des véhicules au Japon ne se subdivisant pas comme pour HDM-4, nous avons effectué un calibrage pour rendre égaux la valeur totale des deux frais de véhicule de HDM-4 et les frais d'entretien de véhicule au Japon montrés dans le Tableau 6. La Figure 4 donne la procédure de calibrage et le Tableau 3 les résultats.

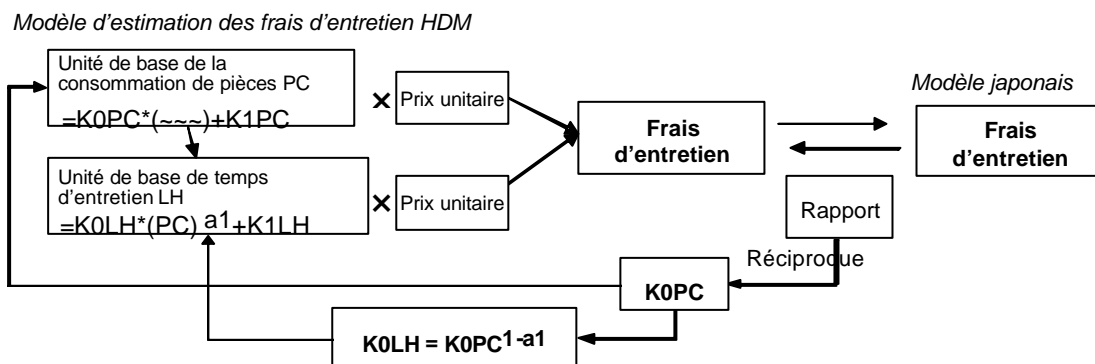


Figure 4 - Procédure de calibrage du modèle de frais d'entretien du véhicule

Tableau 3 – Calibrage du modèle de frais d'entretien du véhicule

(yens/km.nbre)	Voiture de tourisme	Camion - nette E	Camion - nette D	Camion moyen	Grand camion	Remorque	Autobus moyen	Grand autobus
Valeur Kp	0,230	0,230	0,280	0,280	0,280	0,280	0,483	0,483
(a) Sortie HDM-4 : entretien (pièces)	0,980	0,677	1,201	3,888	5,698	10,898	14,924	39,040
(b) Sortie HDM-4 : entretien (mécanicien)	2,611	1,434	7,797	10,589	10,138	14,893	15,281	17,284
(c) Estimation des frais d'entretien: (a) + (b)	3,591	2,111	8,998	14,477	15,837	25,791	30,205	56,323
(d) Modèle MRI: Frais d'entretien	5,940	6,690	6,690	5,560	5,560	5,560	5,760	5,760
Rapport (c)/(d)	0,605	0,316	1,345	2,604	2,848	4,639	5,244	9,778
K0PC	1,654	3,169	0,743	0,384	0,351	0,216	0,191	0,102
a1 pour mécanicien	0,547	0,547	0,519	0,519	0,519	0,519	0,517	0,517
K0LH	1,256	1,686	0,867	0,631	0,604	0,478	0,449	0,332
Modèle MRI: Frais d'entretien	5,94	6,69	6,69	5,56	5,56	5,56	5,76	5,76
HDM-4: Total des frais d'entretien	5,94	6,71	6,68	5,55	5,55	5,56	5,75	5,73
HDM-4: Entretien (emploi de pièces)	1,62	2,15	0,89	1,49	2,00	2,35	2,85	3,98
HDM-4: Frais d'entretien (nombre de mécaniciens)	4,32	4,56	5,79	4,06	3,55	3,21	2,90	1,75

E: essence D: Diesel

4.4. Calibrage du modèle de consommation de carburant

Dans HDM-4, la consommation instantanée de carburant (IFC), qui est la consommation de carburant par seconde, est calculée en fonction des conditions de déplacement, pour définir les frais de carburant. La consommation instantanée de carburant est exprimée par la formule ci-dessous. Les deux facteurs ZETAB et EHP de cette formule font l'objet du calibrage.

$$IFC = ZETAB \times PTOT \times (1 + EHP \times PTOT/PRAT)$$

Où:

IFC: Consommation instantanée de carburant (ml/s)

PTOT: Puissance totale du moteur (kW)

ZETAB: Facteur d'efficacité du moteur, rapport entre IFC et PTOT (ml/s•kW)

EHP: Facteur de correction indiquant que l'efficacité du moteur baisse avec l'augmentation de la puissance

PRAT: Puissance nominale maximale du moteur (kW)

La Figure 5 indique les données pour le calibrage du modèle de consommation de carburant. Ce sont des données obtenues par formule de régression à partir des données de déplacement réel du Centre de Recherche du Génie Civil. Ce calibrage a permis l'estimation de ZETAB et EHP conformément au manuel de calibrage HDM-4. Le Tableau 4 indique les résultats de cette estimation. La consommation instantanée de carburant (ml/s) est indiquée sous forme de comparaison des données du Japon et des valeurs de sortie HDM-4 dans la Figure 6. Comme le montre cette figure, la corrélation entre les valeurs de mesure de IFC et les valeurs estimées HDM-4 est forte, et le modèle de consommation de carburant de HDM-4 reproduit bien la situation réelle.

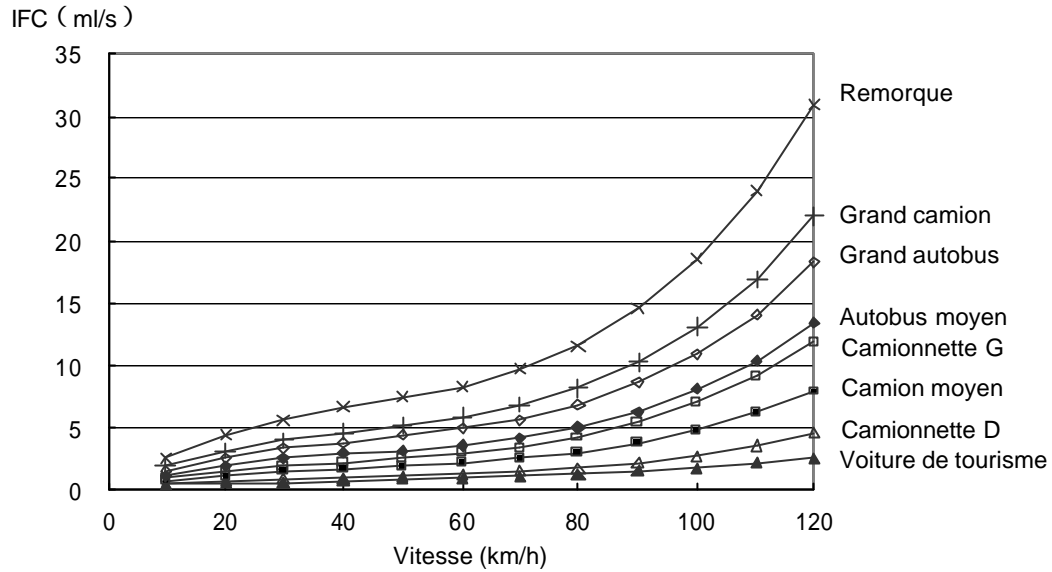


Figure 5 - Données pour le calibrage du modèle de consommation de carburant

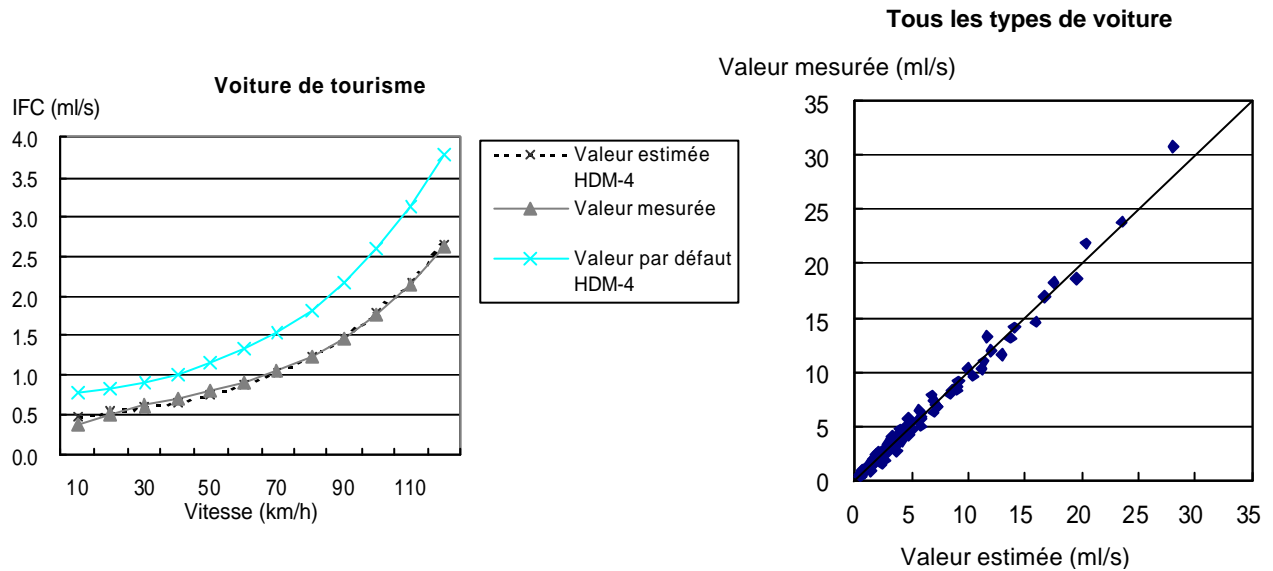


Figure 6 - Relation entre la valeur mesurée de IFC et la valeur estimée de HDM-4

Tableau 4 – Facteurs calibrés du modèle de consommation de carburant

	Voiture de tourisme	Camionnette E	Camionnette D	Camion moyen	Grand camion	Remorque	Autobus moyen	Grand autobus
EHP	0,4802	1,4626	-0,1284	-0,1863	0,0262	-0,0580	-0,1044	0,4734
ZETAB	0,0406	0,0714	0,0446	0,0568	0,0677	0,0795	0,0863	0,0534
R	0,9980	0,9979	0,9866	0,9834	0,9930	0,9903	0,9847	0,9957

4.5. Résumé des résultats du calibrage

Ici, on a essayé d'appliquer HDM-4 en utilisant tous les paramètres calibrés; les frais des usagers des routes calculés (frais de déplacement du véhicule et frais de temps de déplacement) sont indiqués dans le Tableau 5. Pour la comparaison, le Tableau 6 indique les frais des usagers des routes du modèle MRI du Japon (frais de déplacement du véhicule et frais de temps de déplacement).

Les Figures 7 (frais de déplacement du véhicule) et 8 (frais de temps de déplacement) font la comparaison entre les résultats de calcul des frais des usagers des routes par HDM-4 et les résultats du calcul du modèle MRI du Japon. Le calibrage du modèle de frais des usagers des routes de HDM-4 à partir de ces figures a révélé que les résultats des frais des usagers des routes par HDM-4 et les résultats du modèle MRI du Japon coïncident largement.

Tableau 5 - Calcul des frais des usagers des routes par HDM-4

(yens/nombre km)

Détail de l'estimation HDM-4		Voiture de tourisme	Camionnette E	Camionnette D	Camion moyen D	Grand camion D	Remorque D	Autobus moyen D	Grand autobus D
Frais de déplacement du véhicule	Carburant	3.25	12.04	3.17	5.65	12.27	19.19	10.14	11.00
	Huile	0.33	0.78	0.97	1.06	2.14	2.39	1.32	1.77
	Pneus	0.64	1.16	1.17	1.24	2.89	4.52	1.47	2.15
	Emploi de pièces	1.62	2.15	0.89	1.48	1.99	2.40	2.84	3.90
	Entretien	4.33	4.57	5.80	4.03	3.52	3.25	2.90	1.72
	Amortissement	12.82	4.66	4.77	3.67	10.17	8.61	8.65	18.63
	Total	22.98	25.36	16.77	17.12	33.00	40.36	27.32	39.18
Frais de temps de déplacement	Travail du personnel	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.46	21.31
	Frais généraux divers	0.00	27.49	28.17	14.57	16.05	14.06	20.36	21.20
	Temps de déplacement de travail	25,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	414,69	431,98
	Temps de déplacement non-travail	20,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	138,23	143,99
	Temps de stockage des marchandises	0,00	25,38	26,01	31,94	55,32	60,40	0,00	0,00
	Total	45.73	52.87	54.18	46.51	71.37	74.46	593.73	618.49
Total des frais		68.71	78.23	70.95	63.64	104.37	114.82	621.05	657.67

Tableau 6 - Calcul des frais des usagers des routes du modèle MRI domestique

(yens/nombre km)

Type de véhicule/vitesse de déplacement	Voiture de tourisme	Camionnette		Camion ordinaire		Autobus
Type de véhicule correspondant HDM-4	Voiture de tourisme	Camionnette E	Camion moyen	Grand camion	Remorque	
Carburant/Huile	3.06	3.93		8.29		11
Pneus, tube	2.34	1.71		4.68		5.56
Entretien	5.94	6.69		5.56		5.76
Amortissement	3.34	13.53		16.08		21.54
Total frais de déplacement du véhicule	14.68	25.86	25.86	34.62	34.62	43.85
Total frais de temps de déplacement	36.5	25.6	31.9	55.3	60.2	561.0
Total des frais	51.1	51.5	57.8	89.9	94.8	604.9

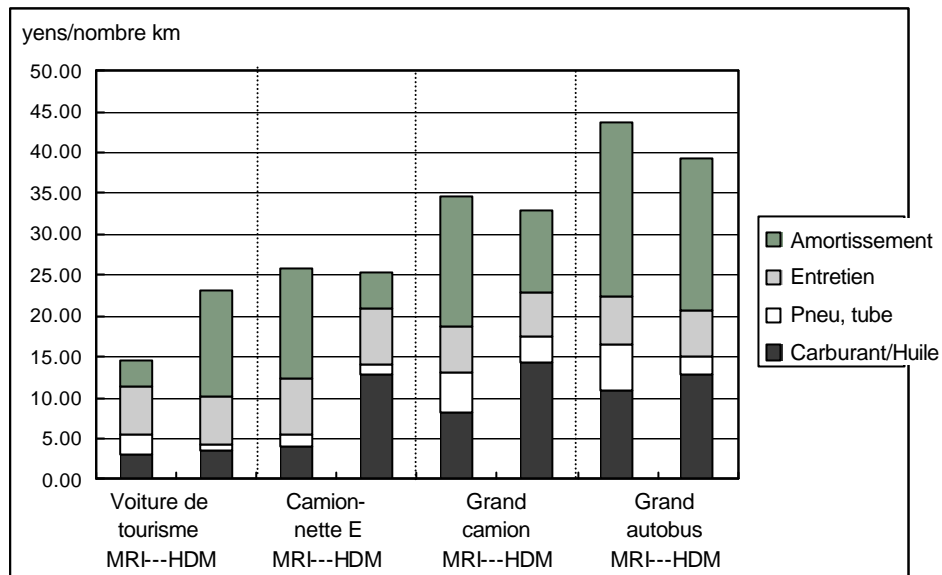


Figure 7 - Comparaison du résultat du calcul des modèles du HDM-4 et MRI des frais de déplacement du véhicule

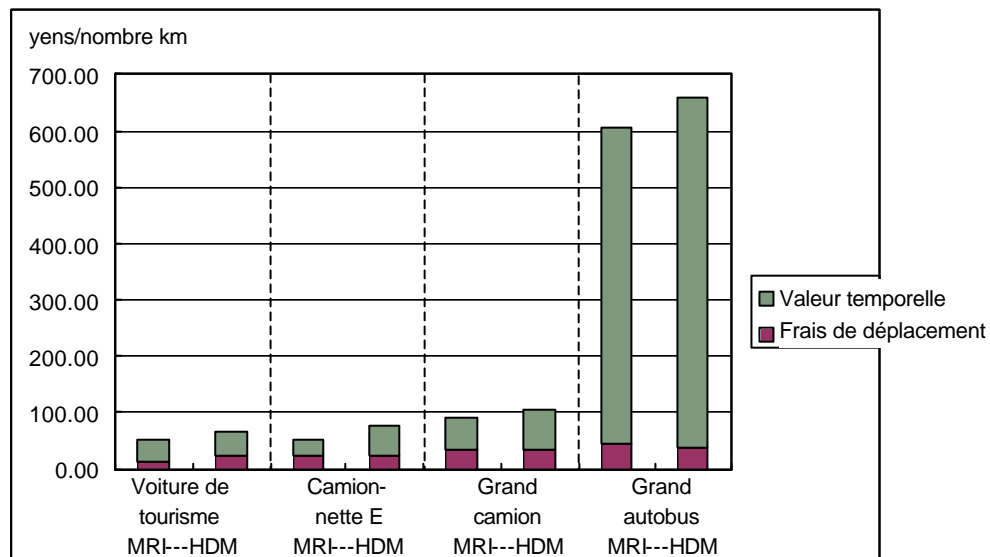


Figure 8 - Comparaison du résultat du calcul des modèles du HDM-4 et MRI des frais de temps de déplacement

5. CALIBRAGE DU MODELE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT

La formule de calcul des émissions des véhicules de HDM-4 est comme suit (Odoki et al., 2001). Le calibrage n'est pas effectué pour le plomb (Pb) parce qu'il n'y a pas de données de mesure.

$$\begin{aligned} \text{NOx: } E_{\text{NOx}} &= 3,6 \cdot \text{Kenox0} \cdot (a_0 + a_1 \cdot \text{Kenox1} \cdot \text{IFC}) \cdot (1 + 0,5 \cdot a_2 \cdot \text{LIFE}) \cdot 10^3 / S \\ \text{CO: } E_{\text{CO}} &= 3,6 \cdot \text{Keco0} \cdot (a_0 + a_1 \cdot \text{Keco1} \cdot \text{IFC}) \cdot (1 + 0,5 \cdot a_2 \cdot \text{LIFE}) \cdot 10^3 / S \\ \text{PM: } E_{\text{PM}} &= 3,6 \cdot \text{Kepar0} \cdot (a_0 + a_1 \cdot \text{Kepar1} \cdot \text{IFC}) \cdot 10^3 / S \\ \text{SO}_2: E_{\text{SO}_2} &= 3,6 \cdot \text{Keso0} \cdot a_0 \cdot a_1 \cdot \text{IFC} \cdot 10^3 / S \end{aligned}$$

$$\text{CO}_2: E_{\text{CO}_2} = 3,6 \cdot \text{Keco0} \cdot a_0 \cdot \text{IFC} \cdot 10^3 / S$$

$$\text{HC}: E_{\text{HC}} = 3,6 \cdot \text{Kehc0} \cdot (a_0 + a_1 \cdot \text{Kehc1} \cdot \text{IFC}) \cdot (1 + 0,5 \cdot a_2 \cdot \text{LIFE}) \cdot 10^3 / S$$

où:

E_XX: Emission de matières XX (CO, NO_x, PM, SO₂, CO₂, HC) (g/véh-km)

S: Vitesse de déplacement du véhicule (km/h)

a0 – a2: Paramètres de modèle internes de HDM-4 par type de véhicule

Ki: Facteur de correction de calibrage (valeur par défaut: 1,0)

LIFE: Vie de service du véhicule (années)

IFC: Consommation instantanée de carburant (ml/s)

Le Tableau 7 indique les résultats du calibrage effectué par calcul de régression pour les différents matériaux en utilisant les données de mesure de la municipalité de Tokyo. A titre d'exemple des résultats, la Figure 9 compare d'une part les valeurs mesurées du CO₂ pour les grands camions et tous les types de véhicule, et d'autre part les valeurs estimées HDM-4. Le facteur de corrélation supérieur à 0,8 pour la plus grande partie indique une forte corrélation. Mais il y a des valeurs un peu faibles. La raison est que la forme de la fonction des sorties de HDM-4 est la courbe convexe vers le bas, alors que les données réelles forment la courbe convexe vers le haut, le facteur de corrélation diminue de ce fait.

Tableau 7 - Résultats du calibrage du modèle d'émissions des véhicules

		Voiture de tourisme	Camionnette E	Camionnette D	Camion moyen D	Grand camion D	Remorque D	Autobus moyen D	Grand autobus D
NOx	Kenox0	0,055	-0,010	-0,100	0,229	-0,546	-0,037	-0,584	-2,015
	Kenox1	2,203	-8,991	-1,540	0,796	-0,647	-6,307	-1,375	-0,386
	R	1,00	0,99	0,99	0,99	0,95	0,95	0,92	0,89
CO	Kec0	0,197	0,006	-0,012	0,145	0,137	-0,362	0,135	-0,154
	Kec1	0,592	3,982	-4,051	7,138	2,324	-3,867	5,518	-4,635
	R	0,66	0,77	0,79	0,79	0,98	0,98	0,96	0,95
PM	Kepar0	-5,380	3,947	1,521	0,153	-0,012	0,034	-0,034	1,228
	Kepar1	-3,103	0,767	3,730	2,940	-37,564	30,893	-30,775	0,794
	R	0,88	0,48	0,52	0,53	0,88	0,88	0,84	0,81
SO₂	Keso0	1,464	4,365	3,835	2,274	1,783	1,287	4,240	2,807
	R	0,99	0,99	0,96	0,96	0,97	0,97	0,95	0,98
CO₂	Keco0	1,114	0,387	0,977	0,580	0,370	0,267	0,864	0,571
	R	0,99	0,99	0,97	0,96	0,98	0,97	0,95	0,98
HC	Kenox0	0,026	-0,053	0,080	-0,040	0,093	-0,071	0,104	0,097
	Kenox1	1,534	0,007	-94,085	182,801	18,328	0,028	1,430	-27,055
	R	0,99	0,99	1,00	0,99	1,00	0,99	0,99	1,00

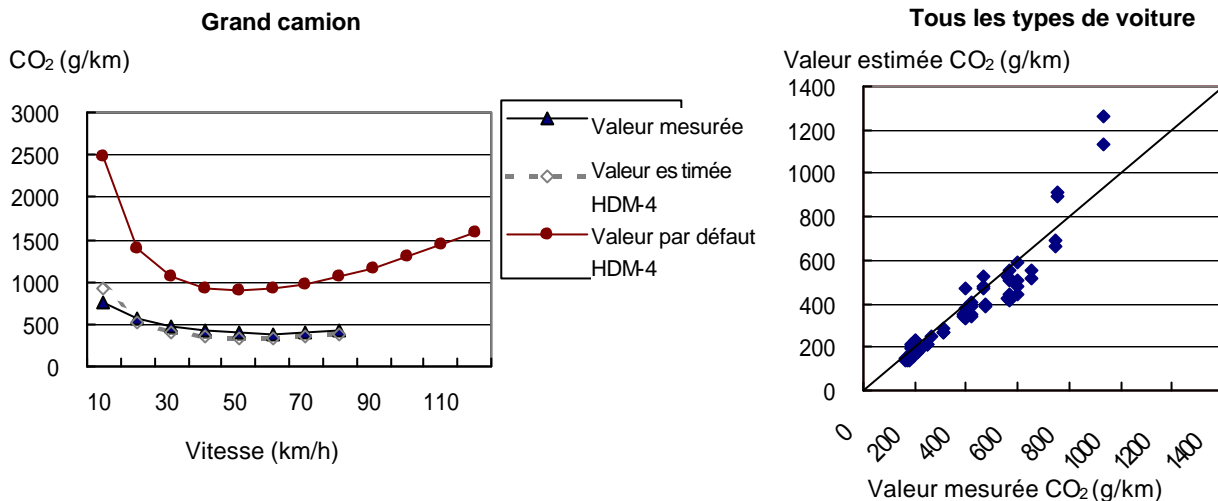


Figure 9 Résultats du calibrage du modèle d'émissions des véhicules (CO₂)

6. ESTIMATION DE LA VALEUR CIBLE DE REFECTION DES ORNIERES AVEC HDM-4

En utilisant HDM-4, nous avons calculé les frais sociaux totaux combinant les frais des gestionnaires des routes basés sur le cycle de vie et les frais des usagers des routes en faisant varier la valeur cible de réfection des ornières, et estimé la valeur cible de réfection idéale des ornières occasionnant les frais sociaux minimum.

6.1. Abrégé

L'application de HDM-4 permet de calculer les frais sociaux (frais de travaux routiers, frais des usagers des routes) de tous les modèles. Pour les modèles de dégradation du pavage, des travaux de coupe/couverture dépassant la valeur cible de réfection seront nécessaires à cause du développement de l'ornière. En faisant varier la valeur cible de réfection de l'ornière indiquant la période de ces travaux, il est possible d'évaluer la variation des frais sociaux.

L'espace cible a été "Autoroute Chuo: Echangeur de Katsunuma – Echangeur de Ichinomiya- misaka (une voie, longueur 2,0 km, vers l'ouest 92,1 kp - 94,1 kp (km à partir du point de départ)". Les frais sociaux selon chaque valeur cible de réfection (frais du gestionnaire de la route et frais des usagers de la route) ont été calculés pour la valeur cible de la réfection par coupe/couverture en faisant varier l'ornière de limite par incréments de 5 mm de 10 à 35 mm. Les autres conditions ont été: taux de décompte de 4%, épaisseur de la couche supérieure du pavage d'asphalte de 40 mm, période d'analyse de 40 ans après la mise en service (1982 – 2021).

6.2. Procédure

Pour l'analyse par HDM-4, six cas indiqués dans le Tableau 8 pour les travaux de réfection des ornières du tronçon ont été prévus. De plus, le cas de base de réfection simplement par entretien ordinaire a été défini, et les six cas ont été évaluées en comparaison avec le cas de base. Le prix unitaire des travaux de coupe/couverture a aussi été défini.

Tableau 8 - Définition de la valeur unitaire des travaux des six cas

Valeur standard de la réfection des ornières (mm)	10	15	20	25	30	35
Épaisseur de coupure/couverture (mm)	40	40	40	40	40	40
Prix unitaire (yens/m ²)	2300	2300	2300	2300	2300	2300

6.3. Résultats du calcul

Le Tableau 9 et la Figure 10 donnent les résultats de l'application de HDM-4.

Vu la valeur actuelle (bénéfice net) des travaux de réfection, comparée au cas de base (cas où la réfection est faite seulement par entretien ordinaire) pour lequel le bénéfice net est 0.0, la valeur cible de réfection des ornières a été déterminée pour maximiser le bénéfice net; le critère de 15 mm assure un bénéfice net maximum de 844 millions et celui de 20 mm un bénéfice de 839 millions. Comparée à la valeur cible de réfection d'ornière de 10 mm, celle de 15 mm laisse espérer un profit de 25 millions et celle de 35 mm de 160 millions environ.

En comparant les frais sociaux incluant les frais du gestionnaire de la route et les frais des usagers de la route, la valeur pour une réfection d'ornière cible de 15 mm est la plus basse (11,01 milliards), puis pour 20 mm (11,02 milliards) et pour 10 mm (11,04 milliards).

La valeur cible de réfection des ornières idéale est 15 à 20 mm dans les deux bases de jugement ci-dessus. Mais dans la version actuelle 1.30 de HDM-4, les frais d'encombrement dus aux travaux routiers ne sont pas pris en compte (ils le seront dans la version 2.0 future). Dans la période d'analyse, des travaux auront lieu 9 fois pour RUT (ornière) 10mm et 4 fois pour RUT 15mm, et le montant des pertes dues aux encombrements des travaux sera considérable. Autrement dit, si les frais d'encombrement dus aux travaux sont inclus dans le cadre d'analyse, les frais des usagers des routes des cas où le nombre de travaux sont nombreux augmenteront, ce qui suggère que la valeur cible de réfection idéale des ornières pourrait être 20 – 25 mm. Elle coïncide avec le critère de gestion actuel de la JH.

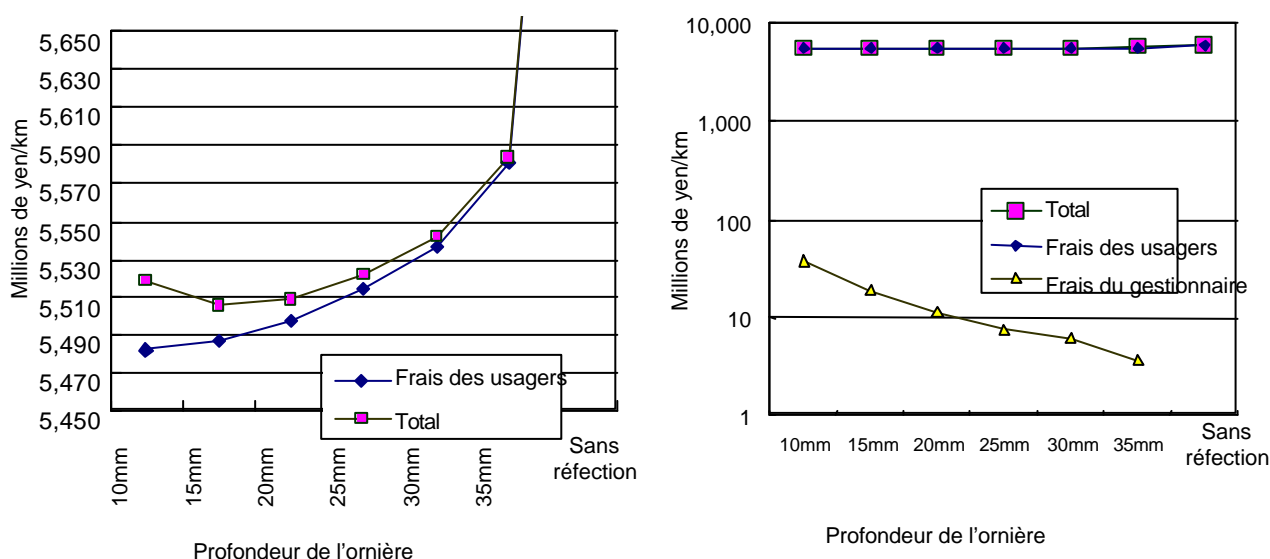


Figure 10 - Comparaison des frais des six cas (frais au km)

Tableau 9 - Analyse comparative des frais des six cas et cas de base

(entre Ichinomiya-misaka – Katsunuma, première voie vers l'ouest 92,1 kp - 94,1 kp, durée d'analyse 40 ans)

Items considérés (unité: millions, valeur de l'an 2000)	Sans réfection	Rut10	Rut15	Rut20	Rut25	Rut30	Rut35
(valeur convertie aux prix 2000)	Cas de base	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Cas 6
Frais du gestionnaire de la route: RAC	0,0	74,0	37,6	22,7	14,7	12,0	7,3
Augmentation des frais du gestionnaire de la route: C	0,0	74,0	37,6	22,7	14,7	12,0	7,3
Frais des usagers des routes: RUC	11.857	10.964	10.976	10.997	11.036	11.106	11.167
Frais sociaux totaux: RAC + RUC	11.857	11.038	11.014	11.020	11.051	11.118	11.174
Bénéfice dû à la réduction des frais des usagers des routes: B	0,0	893	882	861	822	752	691
Autres bénéfices extérieurs: E	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Valeur actuelle nette (NPV: B+E-C)	0,0	819	844	839	807	740	683
(réf.) Rapport bénéfice/frais (B/C)	0,0	12,1	23,5	38,0	56,1	62,5	95,1
(réf.) Rapport NPV/RAC	0,0	11,1	22,5	37,0	55,1	61,5	94,1

7. CONCLUSION

Dans cette étude, pour étudier l'applicabilité de HDM-4 au PMS (système de gestion de pavage) de JH, un tronçon d'autoroute a été sélectionné, les données des ornières et celles des usagers des routes et de l'environnement social ont été collectées et classées, et le calibrage des modèles HDM-4 et leur applicabilité ont été testés. Dans le modèle de dégradation du pavage de HDM-4, on s'est intéressé au modèle des ornières, et le calibrage avec les données d'autoroutes japonaises a été effectué. En utilisant les données concernant les voitures, les données socio-économiques et les données environnementales du Japon, le calibrage du modèle pour frais des usagers des routes et du modèle d'émissions des véhicules de HDM-4 a aussi été effectué. Une reproduction assez précise a ainsi pu être obtenue pour le modèle des usages des routes et le modèle d'émissions des véhicules, mais pour le modèle des ornières, la corrélation avec les données d'observation sur place n'étant actuellement pas très bonne, des études seront encore nécessaires pour réviser le calibrage pour augmenter la précision de l'estimation. Par ailleurs, la valeur cible de réfection des ornières des autoroutes en appliquant HDM-4 a aussi été étudiée. Il est apparu que la valeur cible de réfection des ornières occasionnant le coût de cycle de vie minimum était proche de la valeur cible actuelle de réfection des ornières.

Les thèmes d'étude à venir seront le calibrage des modèles HDM-4 pour les autres déformations telles que fissures et les déformations du pavage composite et du pavage en béton, ou encore l'application de HDM-4 au niveau du réseau routier et les études concernant les mesures concernant le trafic routier.

Documents de référence:

Odoki, J. B. & Kerali. H.G.R. (2001) Highway Development and Management Series
Volume Four: Analytical Framework and Model Descriptions. PIARC

Bennet, C. R. & Paterson, W. D. O. (2001) Highway Development and Management Series
Volume Five: A Guide to Calibration and Adaptation. PIARC