

Jacqueline LLANOS
Chargée de recherche
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
L'OEIL, I.U.P., Université de Paris XII
Paris - France

INTRODUCTION

La Ville de New York gère 842 ponts constitués de 4 500 travées par l'intermédiaire du New York City Department Of Transportation (NYC DOT). Le NYC DOT a un système d'indicateurs physiques de l'état des principaux éléments constitutifs d'une travée. Après inspection, on attribue à chacun des éléments répertoriés une note : le *rating*. Cette note situe l'état physique de l'élément sur une échelle ordinaire d'entiers naturels qui va de 7 à 1 :

— La note de 7 correspond à "l'état neuf".

— A partir de la note de 3, l'élément ne fonctionne plus comme prévu lors de sa conception.

— L'élément reçoit la note de 1 lorsqu'il est à changer.

Les relevés des inspections de 1982, 1985, 1988 et 1989 sont consignés dans la base de données du NYC DOT.

Le type de travée le plus répandu à New York est celui d'une structure métallique qui supporte une dalle en béton armé équipée ou non d'une chaussée. Ces dalles ont environ 20 cm d'épaisseur. Les facteurs qui contribuent le plus à la dégradation de ces structures sont l'eau et les sels de déverglaçage répandus sur la surface de roulement. Le *rating* de la dalle est le *Structural Deck Rating* (SDR). Il est attribué sur examen des efflorescences, des épaufrures, des fissures, de l'écaillage, de la désintégration du béton, des traces d'humidité, des infiltrations, des armatures apparentes (l'état de la chaussée n'entre pas dans le SDR, car il fait l'objet d'un autre *rating*).

L'évolution au cours du temps du SDR des dalles non réparées depuis leur conception, situées en milieu urbain, en béton armé coulé en place, avec armatures non peintes et coffrage non perdu a permis d'étudier la dégradation de ces dalles au cours du temps hors maintenance. Il était essentiel de distinguer les dalles qui n'avaient pas de chaussée de celles qui en avaient une. En effet, celles-ci sont davantage protégées des eaux de surface et des sels de déverglaçage. Ceci apparaîtra clairement sur les modèles de dégradation établis. Pour autant, a-t-on intérêt à construire une chaussée ?

1. MODELE DE DEGRADATION DES DALLES SANS CHAUSSEE

Toutes les travées étudiées ont été sélectionnées sur les critères suivants :

- i) la structure porteuse est métallique ; elle supporte une dalle en béton armé ;
- ii) la dalle est du type dalle en béton armé coulé en place, avec armatures non peintes

(*cast-in-place Portland cement concrete uncoated rebars*) ;

iii) les travées supportent un trafic routier ;

iv) la dalle n'a pas subi de grosse réparation depuis sa mise en service ;

v) la dalle n'a pas été construite avec un coffrage perdu ; c'est-à-dire que la sous-face de la dalle reste visible et que l'on peut suivre sa dégradation au cours des inspections successives ;

vi) la dalle ne porte pas de chaussée, les véhicules roulent directement sur le béton de la dalle.

Parmi les travées sélectionnées à l'aide des critères i) à vi), nous avons dû éliminer toutes les travées dont les dalles avaient subi des réparations partielles et localisées ainsi que les travées reconstruites. En effet, ni les réparations ni les reconstructions ne sont répertoriées dans la base de données ; ces interventions sont décelables par l'augmentation du SDR qui en résulte. La distribution présentée ci-dessous repose sur 62 relevés de SDR relatifs à 22 travées différentes qui appartiennent à 8 ponts différents.

1.2. Distribution du *Structural Deck Rating*

La distribution du *Structural Deck Rating* en fonction de l'âge des dalles sans chaussée figure au graphique 1. Les points de la distribution représentent les moyennes des SDR pour les âges considérés. On constate que la dégradation est rapide et que les dalles atteignent le SDR de 1 entre 25 et 30 ans. Les dalles qui entre 40 et 55 ans ont un SDR supérieur ou égal à 1, ont très vraisemblablement été réparées au cours de leur vie ; mais ces réparations n'ont pas été répertoriées.

Graphique 1



Source : base de données des ponts de la Ville de New York, Inspection, Research & Development, Bureau of Bridges, NYC DOT.

1.3. Modèle de dégradation pour les dalles sans chaussée

La théorie de la régression linéaire permet d'ajuster une droite aux points expérimentaux obtenus dans l'intervalle compris entre 0 et 30 ans. L'équation de la droite est :

$$SDR = 7 - 0,2 A$$

où A est l'âge de la dalle non entretenue, non réparée et non reconstruite depuis sa mise en service. Entre 0 et 30 ans, le taux de dégradation de la dalle est d'environ 0,2 point de rating par an, soit un point tous les cinq ans. La dégradation de la dalle est rapide et sa durée de vie est courte. A partir de trente ans, si aucune intervention n'a été effectuée sur la dalle, le SDR reste constant et égal à un, jusqu'à l'effondrement de la dalle. Peut-on augmenter la durée de vie de la dalle ?

2. EFFET DE LA CONSTRUCTION D'UNE CHAUSSEE

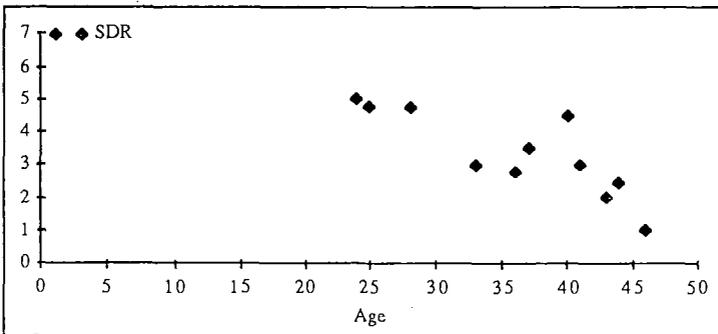
Quelle est la durée de vie moyenne d'une dalle de même type que celles étudiées ci-dessus, mais équipée d'une chaussée du type *Portland cement concrete overlay* ou *Asphalt concrete overlay* (respectivement chaussée en béton et chaussée en asphalte de ciment) ?

2.1. Distribution du Structural Deck Rating pour une dalle avec chaussée

Les travées sélectionnées dans la base de données satisfont aux critères de i) à v) précédents ainsi qu'au critère vii) la dalle comporte une chaussée qui appartient aux types suivants : *Portland cement concrete overlay*, ou *Asphalt concrete*, ou *Asphalt concrete block*. Comme précédemment, toutes les dalles reconstruites ou ayant subi des réparations partielles et localisées ont été éliminées. Par ailleurs, nous avons ajouté des relevés de *ratings* obtenus lors des inspections de 1977 et 1978 (ils ne sont pas dans la base de données mais dans les procès-verbaux d'inspection). Les points de la distribution figurent les moyennes des *Structural Deck Ratings* pour les âges considérés (Cf. graphique 2).

On peut distinguer deux phases dans la dégradation des dalles : i) entre 0 et 25 ans, la vitesse de dégradation est assez faible, le SDR de 5 est atteint l'âge d'environ 25 ans ; ii) entre 25 et 45 ans, la vitesse de dégradation est plus grande ; la dalle passe en vingt ans environ du SDR de 5 à celui de 1.

Graphique 2



Source : d'après la base de données des ponts de la Ville de New York, Inspection, Research & Development, Bureau of Bridges, NYC DOT.

2.2. Modèle de dégradation pour les dalles avec chaussée

La première phase de la dégradation peut être modélisée sous la forme :

$$SDR = 7 - 0,08 A \quad 0 = < A = < 25$$

la vitesse de dégradation est deux fois plus lente que pour une dalle sans chaussée pendant le même intervalle d'âge. La deuxième phase de la dégradation peut être modélisée sous la forme :

$$SDR = 5 - 0,16 (A - 25) \quad 25 = < A = < 50$$

la dalle atteint le SDR de 1 à 50 ans. A partir de cinquante ans, si aucune intervention n'est effectuée sur la dalle, le SDR reste constant et égal à un, jusqu'à l'effondrement de la dalle.

3. LES COÛTS A CONSIDERER

3.1. Dépenses de maintien en service des dalles avec ou sans chaussée

A partir d'un certain stade de dégradation de la dalle, le gestionnaire doit effectuer des dépenses de maintien en service de la dalle. Ces dépenses sont engendrées :

— par les inspections *supplémentaires* pratiquées par la division *Inspection, Research & Development* pour surveiller l'état de la dalle, assurer la sécurité des usagers et prévoir les interventions du programme *Make Safe* ;

— par le programme *Make Safe* destiné à supprimer momentanément les dangers imminents dus à la dégradation de la dalle ; ils sont appelés *flags* parce qu'ils sont signalés sur le site par un drapeau. Il s'agit, par exemple, du clouage de planches de bois sur la sous-face de la dalle pour éviter que les morceaux de béton qui s'en décollent ne tombent sur la voie franchie, ou de l'installation de plaques métalliques sur la dalle pour recouvrir les trous et assurer le maintien du trafic. Il faut remarquer que ces interventions ne sont pas des réparations : elles permettent temporairement le maintien en service du pont sans pour autant augmenter le SDR de la dalle.

On peut penser que si la Ville de New York consent à ces dépenses supplémentaires pour assurer la sécurité et la viabilité, c'est que les coûts sociaux qui seraient supportés par la collectivité à cause du mauvais état de la dalle (accidents, ralentissements, interruptions du trafic) sont supérieurs à ces dépenses. La Ville opère ainsi une internalisation d'une partie des coûts sociaux qui autrement seraient supportée par la collectivité.

Le budget total alloué aux dépenses de maintien en service des dalles comprend :

— le budget consacré aux inspections (personnel, matériel, et équipement) de la division *Inspection, Research and Development* du Bureau des Ponts du NYC DOT, qui s'élève à 2,5 millions de dollars par an ;

— le budget du programme *Make Safe*, qui a été d'environ 7 millions de dollars pour l'année 1990.

Les dépenses de maintien en service se sont donc élevées à environ 9,5 millions de dollars en 1990, pour les 1,1 millions de mètres carrés de dalles en béton armé gérés par la Ville de New York. Ces dépenses s'appliquent aux dalles avec ou sans chaussée dont le

SDR est inférieur ou égal à 4 :

- 10% pour l'ensemble des travées de SDR inférieur ou égal à 4 et supérieur à 3, soit 0,95 million de dollars par an ;
- 20% pour l'ensemble des travées de SDR inférieur ou égal à 3 et supérieur à 2, soit 1,9 millions de dollars par an ;
- 30% pour l'ensemble des travées de SDR inférieur ou égal à 2 et supérieur à 1, soit 2,85 millions de dollars par an ;
- 40% pour l'ensemble des travées de SDR égal à 1, soit 3,8 millions de dollars par an.

Par ailleurs, le SDR des 1,1 millions de mètres carrés de dalles en béton armé est connu : on peut donc dégager les dépenses surfaciques annuelles de maintien en service d'une dalle en béton armé selon son SDR. Elles apparaissent au tableau ci-dessous :

Tableau 1 : Dépenses de maintien en service des dalles en fonction du *Structural Deck Rating*

SDR	Surface totale 1000 m ²	Dépenses totales (M\$)	Dépenses surfaciques (\$/m ²)
1	18,6	3,8	204
2	76	2,85	37,5
3	223,2	1,9	8,5
4	306,9	0,95	3
Total	624,7	9,5	

Source : d'après les informations de la division Inspection, Research & Development, Bureau of Bridges, NYC DOT.

Les dépenses de maintien en service des dalles augmentent selon le SDR. On notera que sur 1,1 millions de mètres carrés de dalles en béton armé, environ 625 milliers ont un SDR inférieur ou égal à 4, soit plus de la moitié.

3.2. Coût de réparation des dalles sans chaussée

La valeur du *Structural Deck Rating* (SDR) renseigne sur l'état de la dalle et sur la nature et l'étendue des réparations locales envisageables :

- 1) Si le SDR est inférieur ou égal à 5 et supérieur à 4, des réparations localisées de surface (*concrete surface repair*) sont envisageables sur environ 5% de la surface de la dalle.
- 2) Si le SDR est inférieur ou égal à 4 et supérieur à 3, des réparations localisées de reconstitution (*patching*) de la dalle sont envisageables sur environ 5% de la surface de la dalle.
- 3) Si le SDR est inférieur ou égal à 3 et supérieur ou égal à 2, le *patching* est envisageable sur environ 10% de la surface de la dalle.

A partir d'informations (Yanev, 1989) sur les deux types de réparation locale *concrete surface repair* et *patching*, on a pu établir leurs coûts (salaires, production journalière, équipement et matériel) :

- 1) le coût du *concrete surface repair* est de 1 160 dollars par mètre carré de surface à

réparer, soit 58 \$/m² rapporté à la surface de la dalle (puisque 5% de la surface de la dalle est concerné par la réparation) ;

2) le coût du *patching* est de 505 dollars par mètre carré de surface à réparer, soit 25 \$/m² rapporté à la surface de la dalle pour un SDR inférieur ou égal à 4 et supérieur à 3 (5% de la surface de la dalle est concernée par la réparation) ;

3) pour un SDR inférieur ou égal à 3 et supérieur ou égal à 2, le coût du *patching* est également de 505 dollars par mètre carré de surface à réparer, soit 50 \$/m² rapporté à la surface de la dalle (10% de la surface de la dalle est alors concernée par la réparation).

3.3. Coût de reconstruction des dalles sans chaussée

D'après le NYC DOT, le coût surfacique de *construction* d'une dalle du type étudié est d'environ 915 \$/m², tandis que son coût de *reconstruction* sous trafic est d'environ 1 130 \$/m². Le coût de *reconstruction* comprend la démolition de l'ancienne dalle et les dépenses de signalisation et de dispositifs de sécurité lorsqu'on reconstruit la dalle par demi-chaussée. Ce coût est 20 % plus élevé que le coût de construction d'une dalle sur un nouveau pont.

3.4. Coût de construction d'une chaussée

Le coût de construction d'une chaussée représente de 1 % à 2 %, selon le type de chaussée, du coût de construction de la dalle. Le coût de construction d'une chaussée représente environ 1 % à 2 %, selon le type de chaussée, du coût de reconstruction de la dalle.

Tableau 2 : Coûts de construction de chaussées

Type	Coût unitaire \$/m ²
Portland cement concrete overlay	21,5
Asphalt concrete	10,5

Source : D'après *Means Building Construction Cost Data*, 1991.

Le prolongement de 20 ans de la durée de vie de la dalle dû à la présence d'une chaussée suppose que celle-ci existe bien : c'est-à-dire qu'on la renouvelle tous les dix ans environ (fréquence du NYC DOT). Ce prolongement de la durée de vie compense-t-il les dépenses de renouvellement de la chaussée et le sur-investissement initial ?

Les dépenses effectuées au cours de la séquence de maintien en service d'une dalle avec chaussée pendant les 55 ans de sa durée de vie comprennent :

- les dépenses de renouvellement de la chaussée tous les 10 ans (100 \$/m²) ;
- les dépenses de maintien en service de la dalle (inspections supplémentaires et *flags*) à partir du moment où la dalle passe en deçà du SDR de 4.

4. LES HYPOTHESES

4.1. Dalles sans chaussée

Chaque réparation est caractérisée par son coût et par l'âge de la dalle où elle peut

être effectuée (ou par le SDR, puisqu'il y a bijection entre l'âge et le SDR entre 0 et 30 ans) ; le *patching* effectué au SDR de 3 et le *patching* effectué au SDR de 2 seront considérés comme deux interventions différentes. On se placera dans la suite sous les cinq hypothèses suivantes :

(H0) On ne peut pas élever deux fois le SDR par la même intervention.

(H1) Toute intervention sur une dalle sans chaussée augmente le SDR de 1 point.

(H2) La dalle sans chaussée réparée suit le même modèle de dégradation que la dalle non réparée.

Comme chacune des interventions locales élève le SDR de un point, il s'en suit que chacune prolonge la durée de vie de la dalle de cinq ans. Mais ces interventions ne sont pas toutes équivalentes du point de vue de leur rentabilité comme nous le verrons à la section 5.

4.1. Dalles avec et sans chaussée

(H3) Toutes les dalles avec ou sans chaussée sont utiles à la collectivité.

(H4) L'avantage annuel que la collectivité retire de la dalle avec ou sans chaussée diminue par palier de la façon suivante :

— Du SDR de 7 au SDR de 3, toutes les dalles offrent les mêmes avantages à la collectivité.

— En deçà du SDR de 3, la dalle ne peut plus supporter la totalité du trafic pour lequel elle a été conçue ; on doit fermer des voies de circulation ou limiter les charges admissibles ; de plus, on doit interrompre le trafic pour venir enlever les *flags*.

— Du SDR de 3 au SDR de 2, l'avantage annuel retiré de la dalle par la collectivité ne représente que 75 % de l'avantage annuel retiré d'une dalle neuve.

— Du SDR de 2 au SDR de 1, l'avantage annuel retiré de la dalle par la collectivité ne représente que 50 % de l'avantage annuel retiré d'une dalle neuve.

(H5) Lorsqu'une dalle a un SDR égal à 1 depuis 5 ans, il faut fermer le pont totalement au trafic à cause de la dégradation de la dalle.

5. SEQUENCE DE MAINTENANCE OPTIMALE D'UNE DALLE SANS CHAUSSEE

Des hypothèses (H3) et (H5), il découle que la somme des avantages actualisés retirés du maintien en service d'une dalle pendant 35 ans est supérieure au coût de sa reconstruction, sinon la collectivité n'aurait pas intérêt à reconstruire la dalle. Ceci fournit une limite inférieure de l'avantage annuel que la collectivité retire d'une dalle neuve. Soient a_0 l'avantage annuel surfacique que la collectivité retire d'une dalle neuve, et c_{rec} le coût de reconstruction surfacique de la dalle, il vient d'après l'hypothèse (H3) :

$$a_0 \sum_{k=0}^{19} \frac{1}{(1+r)^k} + \frac{0,75 a_0}{(1+r)^{20}} \sum_{k=0}^4 \frac{1}{(1+r)^k} + \frac{0,50 a_0}{(1+r)^{25}} \sum_{k=0}^9 \frac{1}{(1+r)^k} > c_{rec}$$

D'où les limites inférieures de l'avantage annuel retiré d'une dalle neuve par la collectivité,

selon le taux d'actualisation r , avec un coût de reconstruction de 1 130 \$/m² :

- $r = 5\%$: a_0 est supérieur à 75 \$/m² et par an ;
- $r = 9\%$: a_0 est supérieur à 105 \$/m² et par an ;
- $r = 12\%$: a_0 est supérieur à 125 \$/m² et par an.

Sous les hypothèses formulées, les rentabilités des interventions envisageables vont être déterminées.

5.1. Rentabilité d'une intervention

Prenons l'exemple d'une dalle de SDR égal à 5, et calculons $b(5)$ le bénéfice qu'apporte l'option *réparer au SDR de 5 plutôt que ne rien faire* :

i) La somme des avantages surfaciques annuels actualisés que la collectivité va retirer de la dalle réparée (la dalle réparée a un SDR égal à 6) est :

$$av(6) = a_0 \sum_{k=0}^{14} \frac{1}{(1+r)^k} + \frac{0,75 a_0}{(1+r)^{15}} \sum_{k=0}^4 \frac{1}{(1+r)^k} + \frac{0,50 a_0}{(1+r)^{20}} \sum_{k=0}^9 \frac{1}{(1+r)^k}$$

ii) La collectivité va perdre la somme des avantages surfaciques annuels actualisés que la dalle non réparée aurait rendus jusqu'à la fin de sa vie au SDR de 5, hors maintenance :

$$av(5) = a_0 \sum_{k=0}^9 \frac{1}{(1+r)^k} + \frac{0,75 a_0}{(1+r)^{10}} \sum_{k=0}^4 \frac{1}{(1+r)^k} + \frac{0,50 a_0}{(1+r)^{15}} \sum_{k=0}^9 \frac{1}{(1+r)^k}$$

iii) La collectivité va perdre la somme des dépenses actualisées de maintien en service que la dalle réparée va engendrer jusqu'à la fin de sa vie, hors maintenance (inspections supplémentaires et *flags*) :

$$flag(6) = \frac{F_4}{(1+r)^{10}} \sum_{k=0}^4 \frac{1}{(1+r)^k} + \frac{F_3}{(1+r)^{15}} \sum_{k=0}^4 \frac{1}{(1+r)^k} + \frac{F_2}{(1+r)^{20}} \sum_{k=0}^4 \frac{1}{(1+r)^k} + \frac{F_1}{(1+r)^{25}} \sum_{k=0}^4 \frac{1}{(1+r)^k}$$

iv) La collectivité gagne la somme des dépenses actualisées de maintien en service que la dalle non réparée aurait engendrée jusqu'à la fin de sa vie, hors maintenance :

$$flag(5) = \frac{F_4}{(1+r)^5} \sum_{k=0}^4 \frac{1}{(1+r)^k} + \frac{F_3}{(1+r)^{10}} \sum_{k=0}^4 \frac{1}{(1+r)^k} + \frac{F_2}{(1+r)^{15}} \sum_{k=0}^4 \frac{1}{(1+r)^k} + \frac{F_1}{(1+r)^{20}} \sum_{k=0}^4 \frac{1}{(1+r)^k}$$

v) La collectivité perd les dépenses d'intervention sur la dalle au SDR de 5, soit $crep(5)$.

Faisons le bilan de ces gains et de ces pertes. Le bénéfice $b(5)$ apporté par unité de surface par la réparation de la dalle au SDR de 5 s'écrit :

$$b(5) = av(6) - av(5) - flag(6) + flag(5) - crep(5)$$

D'une manière générale, le bénéfice $b(R)$ (R compris entre 5 et 2) apporté par unité de surface par la réparation de la dalle au SDR de R s'écrit :

$$b(R) = av(R+1) - av(R) - flag(R+1) + flag(R) - crep(R)$$

où $av(R)$ est la somme des avantages surfaciques annuels actualisés que la collectivité va retirer d'une dalle de SDR égal à R , hors maintenance, jusqu'à la fin de sa vie ; où $flag(R)$ est la somme des dépenses actualisées de maintien en service que va engendrer une dalle de SDR égal à R , hors maintenance, jusqu'à la fin de sa vie.

Si $b(R) > 0$, la réparation est rentable ; si $b(R) < 0$, la réparation n'est pas rentable, et $b(R)$ exprime alors la perte totale engendrée par la réparation.

Cependant, le bénéfice apporté par la réparation ne rend pas entièrement compte de la rentabilité de la dépense budgétaire $crep(R)$. En effet, le bénéfice $b(R)$ peut être élevé parce que la dépense effectuée $crep(R)$ est relativement élevée. Le gain par unité de budget dépensée mesure, lui, la rentabilité de la réparation. C'est le critère que nous retiendrons pour comparer les rentabilités respectives des réparations aux SDR de 5, 4, 3, et 2. Ainsi,

$$g(R) = \frac{b(R)}{crep(R)}$$

mesure le gain par unité de budget dépensée apporté par la réparation d'une dalle de SDR égal à R , pour élever son SDR jusqu'à $R+1$.

On peut calculer $g(R)$ pour chaque intervention envisageable sur la dalle :

Tableau 3. : Rentabilité de l'unité de budget dépensée pour la réparation des dalles selon le *Structural Deck Rating*

SDR	5%	9%	12%
5	320 %	210 %	135 %
4	1 140 %	1 020 %	860 %
3	660 %	710 %	690 %
2	600 %	750 %	790 %

On constate que :

1) pour un taux d'actualisation compris entre 5% et 12%, toutes les interventions sont rentables. Par conséquent, si le budget le permet, il faut réparer toutes les dalles aux SDR de 5, 4, 3, et 2.

2) toutes les interventions ne sont pas également rentables. Pour un taux d'actualisation compris entre 5 % et 12 %, c'est la réparation de la dalle au SDR de 4 qui apporte le plus de gain par unité de budget dépensée. Si le taux d'actualisation est égal à 9 % (taux moyen en vigueur dans les pays développés) et si le budget ne permet pas de réparer toutes les dalles, il faudra commencer par réparer :

— d'abord les dalles qui se trouvent au SDR de 4, car c'est la réparation la plus rentable : elle rapporte 10,2 \$ par dollar dépensé ;

— puis, si le budget n'est pas épuisé, il faudra réparer les dalles qui se trouvent au SDR de 2 ; ces réparations rapportent 7,5 \$ par dollar dépensé ;

— ensuite, si le budget n'est pas épuisé, il faudra réparer les dalles qui se trouvent au SDR de 3 ; ces réparations rapportent 7,1 \$ par dollar dépensé ;

— enfin, si le budget n'est pas encore épuisé, il faudra réparer des dalles qui se trouvent au SDR de 5 ; ces réparations rapportent 2,1 \$ par dollar dépensé.

5.2. Budget annuel optimal de maintenance des dalles sans chaussée

Le budget annuel optimal sera celui qui est nécessaire à la réparation de toutes les dalles telles que $g(R) > 0$; toute réparation d'une dalle telle que $g(R) < 0$ est un gaspillage de ressource.

Si le budget annuel est inférieur au budget optimal, on ne peut réparer toutes les dalles telles que $g(R) > 0$. On classe les $g(R)$ par ordre décroissant ; on commencera par réparer la classe de dalles dont le $g(R)$ est le plus grand, et ainsi de suite jusqu'à épuisement du budget.

5.3. Coût de la séquence optimale de maintenance d'une dalle sans chaussée

La séquence optimale de maintenance d'une dalle est celle qui prévoira :

- 1) une réparation du type *deck surface repair* au SDR de 5 pour élever le SDR jusqu'à 6 ;
- 2) une réparation du type *patching* au SDR de 4 pour élever le SDR jusqu'à 5 ;
- 3) une réparation du type *patching* au SDR de 3 pour élever le SDR jusqu'à 4 ;
- 4) une réparation du type *patching* au SDR de 2 pour élever le SDR jusqu'à 3.

Au bout de 50 ans, la dalle atteint le SDR de 1. Selon l'hypothèse (H5), la dalle peut continuer de rapporter 50 % des avantages d'une dalle neuve pendant encore cinq années. Une dalle pourra être maintenue en service pendant une moyenne de 55 ans. Les dépenses engendrées par 55 ans de maintien en service de la dalle comprennent : les dépenses de réparations aux différents SDR ainsi que les dépenses de la séquence de maintien en service de la dalle (inspections supplémentaires et *flags*) qui interviennent dès que la dalle passe en deçà du SDR de 4. Soit :

- 185 \$/m² pour un taux d'actualisation égal à 5 % ;
- 55 \$/m² pour un taux d'actualisation égal à 9 % ;
- 30 \$/m² pour un taux d'actualisation égal à 12 %.

6. FAUT-IL CONSTRUIRE UNE CHAUSSEE ?

6.1. Au bout de 35 ans on ne reconstruit pas la dalle sans chaussée

Sous les hypothèses faites plus haut, hors maintenance, une dalle avec chaussée va, à 35 ans, continuer à offrir un avantage annuel égal à celui d'une dalle neuve pendant encore trois ans. A partir du SDR de 3, la dalle avec chaussée ne fournira plus que 75 % de l'avantage d'une dalle neuve pendant six ans. A partir du SDR de 2, la dalle avec chaussée ne fournira plus que 50 % des avantages d'une dalle neuve pendant encore 11 ans. Le tableau 4 récapitule : i) les dépenses de construction et de maintien en service d'une dalle sans chaussée, hors maintenance, pendant les 35 ans de sa durée de vie, ainsi que les avantages que la dalle génère pendant cette durée ; ii) les dépenses de

construction et de maintien en service d'une dalle avec chaussée, hors maintenance, pendant les 55 ans de sa durée de vie, ainsi que les avantages que la dalle génère pendant cette durée.

Tableau 4 : Limites inférieures du bénéfice apporté par la construction d'une chaussée

Taux d'actualisation	5 %		9 %		12 %	
	sans \$/m ²	avec \$/m ²	sans \$/m ²	avec \$/m ²	sans \$/m ²	avec \$/m ²
Coût moyen construction	-915	-930	-915	-930	-915	-930
Dépenses de maintien en service	-285	-260	-95	-95	-45	-55
Avantages	+1 170	+1 415	+1 150	+1 250	+1 110	+1 160
Bilan	-30	+225	+140	+225	+150	+175
Bénéfice dû construction de la chaussée		+255		+85		+25

Ainsi, une dépense moyenne de 15 \$/m² pour la construction d'une chaussée procure :

- au taux d'actualisation de 5 %, 255 \$/m² de bénéfice ; la rentabilité de l'unité budgétaire dépensée pour la construction de la chaussée est donc de 1700 % ;
- au taux d'actualisation de 9 %, 85 \$/m² de bénéfice ; la rentabilité de l'unité budgétaire dépensée pour la construction de la chaussée est donc de 565 % ;
- au taux d'actualisation de 12 %, 25 \$/m² de bénéfice ; la rentabilité de l'unité budgétaire dépensée pour la construction de la chaussée est donc de 165 %.

Or, il s'agit-là de limites inférieures du bénéfice apporté par la construction d'une chaussée ; en effet, le bénéfice réel est plus grand pour trois raisons :

- i) nous n'avons pas tenu compte des coûts sociaux supportés par la collectivité par l'arrêt du trafic sur la dalle sans chaussée, pendant les 20 années au cours desquelles la dalle avec chaussée continue d'écouler du trafic ; ces coûts sociaux seraient à ajouter au bilan de la dalle sans chaussée, ou alors il faut ajouter le coût de reconstruction de la dalle sans chaussée ;
- ii) nous n'avons pas tenu compte de la dégradation plus rapide de la structure métallique sous la dalle dans le cas où la dalle n'a pas de chaussée ; cette dégradation plus rapide se traduit par un surcoût qui serait aussi à compter dans le bilan de la dalle sans chaussée ;
- iii) les avantages supplémentaires apportés à la collectivité par la dalle avec chaussée sont calculées à l'aide des limites inférieures des avantages annuels (Cf. section 5).

6.2. Au bout de 35 ans, on reconstruit la dalle sans chaussée

Le tableau 5 récapitule les avantages et les coûts de la construction puis de la reconstruction de la dalle sans chaussée au bout de 35 ans, ainsi que ceux dus maintien en service de la dalle avec chaussée pendant 55 ans.

Tableau 5 : Limites inférieures du bénéfice apporté par la construction d'une chaussée

Taux d'actualisation	5 %		9 %		12 %	
	sans \$/m ²	avec \$/m ²	sans \$/m ²	avec \$/m ²	sans \$/m ²	avec \$/m ²
Chaussée						
Coût moyen construction	-915	-930	-915	-930	-915	-930
Coût de reconstruction au bout de 35 ans	-205	0	-55	0	-20	0
Dépenses de maintien en service	-286	-260	-95	-95	-45	-55
Avantages	+1 345	+1 415	+1 200	+1 250	+1 130	+1 160
Bilan	-61	+225	+135	+225	+150	+175
Bénéfice dû construction chaussée		+286		+90		+25

Ainsi, une dépense moyenne de 15 \$/m² pour la construction d'une chaussée procure :

- au taux d'actualisation de 5 %, 286 \$/m² de bénéfice ; la rentabilité de l'unité budgétaire dépensée pour la construction de la chaussée est donc de 1900 % ;
- au taux d'actualisation de 9 %, 90 \$/m² de bénéfice ; la rentabilité de l'unité budgétaire dépensée pour la construction de la chaussée est donc de 600 % ;
- au taux d'actualisation de 12 %, 25 \$/m² de bénéfice ; la rentabilité de l'unité budgétaire dépensée pour la construction de la chaussée est donc de 165 %.

7. CONCLUSION

Sous les hypothèses posées, l'investissement qui consiste à construire une chaussée apparaît comme économiquement rentable. On pourra conduire une étude de sensibilité sur les hypothèses posées.

REFERENCES

Llanos, Jacqueline, *L'économie de la maintenance des ponts routiers*, Thèse de doctorat polygr., Université de Paris XII, France, 1991, 315p.

Yanev, Bojidar, *Corrective Repairs for New York City Bridges*, NYC DOT polygr., New York, 1989, 130p.