

LA RÉHABILITATION DES CHAUSSÉES:
ÉTAT DES CONNAISSANCES ET
STRATÉGIES DE RÉHABILITATION

par *Gérard Tessier, ing.*
*Ministère des Transports
du Québec*



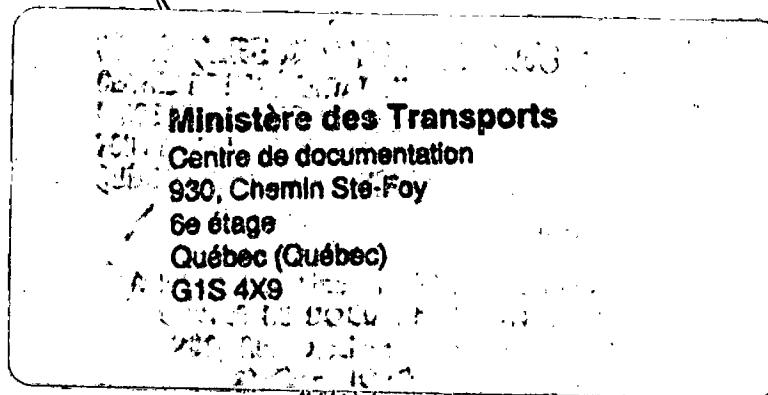
GOVERNEMENT DU QUÉBEC
MINISTÈRE DES TRANSPORTS
SERVICE DES SOLS ET MATÉRIAUX

CANQ
TR
GE
ST
102

470 721

LA RÉHABILITATION DES CHAUSSÉES:
ÉTAT DES CONNAISSANCES ET
STRATÉGIES DE RÉHABILITATION

par *Gérard Tessier, ing.*
*Ministère des Transports
du Québec*



Paru dans
Routes du Québec no 12
Septembre 1974

CANQ
TR
GE
ST
102

QTRD

1113

MINISTÈRE DES TRANSPORTS
CENTRE DE DOCUMENTATION
PLACE HAUTE-VILLE, 24^e ÉTAGE
700 EST, BOUL. ST-CYRILLE
QUÉBEC, QUÉBEC, G1R 5H1

**LA RÉHABILITATION DES CHAUSSÉES:
ÉTAT DES CONNAISSANCES ET STRATÉGIES DE RÉHABILITATION**

par *Gérard Tessier, ing.*
Ministère des Transports du Québec

SOMMAIRE

L'auteur démontre la nécessité de l'évaluation des chaussées pour pouvoir préciser diverses alternatives de design. Il décrit un processus global de réhabilitation et donne quelques modèles permettant de déterminer, soit les coûts de construction et d'entretien, soit le comportement des chaussées dans le temps.

INTRODUCTION

On peut considérer trois sortes de réhabilitation:

- 1- la réhabilitation corrective (entretien majeur) qui corrige les conditions existantes;
- 2- la réhabilitation préventive qui prévient une dégradation spécifique et trop rapide d'une chaussée;
- 3- le changement de fonction (renforcement).

La bonne stratégie de réhabilitation dépend de l'habileté de l'ingénieur à prédire un besoin spécifique associé à une action corrective ou à un renforcement à un moment où une condition de chaussée est indésirable. Un procédé combinant la condition de surface, la résistance structurale et la viabilité pourrait être développé afin d'établir des priorités de réhabilitation. Avec de telles données auxquelles on ajoute un programme d'activation (feedback), il devient possible d'établir un système de priorités qui groupe les chaussées selon les besoins en entretien majeur ou réhabilitation.

Les alternatives de stratégies de design devraient inclure les divers modes de réhabilitation future en termes de couches d'usage, de renforcements, de couches de scellement ou autres modes d'entretien. C'est la fonction de l'activité "Evaluation de chaussée" de mesurer périodiquement les extrants de façon à:

- fournir des données pour vérifier les prévisions du design et les modifier si nécessaire;
- recéduler les programmes de réhabilitation selon ces modifications de design;
- fournir des données pour rendre plus adéquats les modèles de design eux-mêmes;
- fournir l'information nécessaire à la mise à jour des programmes de réhabilitation du réseau routier.

COMMENT RÉHABILITER LA CHAUSSÉE

Dans une communication précédente, on a répondu aux questions où et quand réhabiliter la chaussée. La réponse à la question comment peut s'exprimer en une formule assez simpliste qui demande toutefois d'être expliquée. Les données d'input et les critères de comportement et de viabilité conduisent à l'élaboration de stratégies de réhabilitation.

Les données d'input sont les données sur la chaussée actuelle, les données sur l'environnement, les données sur les charges et les données sur les matériaux. Les critères de comportement et de viabilité sont les niveaux de qualité qu'on fixe par des analyses, des études, compte tenu d'un jugement porté sur la qualité de la chaussée. Les stratégies de réhabilitation impliquent un choix parmi plusieurs solutions, dépendant de la qualité désirée, des conditions existantes et des coûts de réalisation. Les stratégies sont établies pour un réseau routier donné et pour des projets particuliers.

La qualité de la chaussée peut être donnée par la déflexion ($\bar{x} + 2\sigma$) et par le coefficient de roulement (K_r).

En regard des stratégies de réhabilitation, il est important de considérer à la fois les besoins du réseau routier total pour une juridiction globale et les besoins d'un projet particulier à l'intérieur d'un réseau routier donné. Les stratégies de réhabilitation doivent donc inclure des procédés pour activer le système total au moins au niveau adéquat pour fournir un outil de base permettant de déterminer un ordre de priorités mettant l'accent sur les projets nécessitant une réhabilitation.

Des critères améliorés ou révisés proviendront d'une recherche continue via le processus de gestion des revêtements.

PROCESSUS GLOBAL DE RÉHABILITATION

Un processus global de réhabilitation nécessite:

- 1- une technologie de design;
- 2- une méthodologie d'évaluation des revêtements existants;
- 3- un feedback des données;
- 4- des modèles d'analyse;
- 5- des modèles de prédiction;
- 6- des modèles de décision.

La réhabilitation est un processus continu dans le temps s'échelonnant tout au long de la vie de la chaussée par cycles de réhabilitation.

- 1- Une technologie de design tient compte des matériaux, des sols, des critères de comportement, de la circulation, des coûts, de l'environnement, et produit un calcul structural, un modèle d'équivalence des matériaux, un modèle de coûts et bénéfiques, une évaluation des alternatives de solutions, des normes de construction et d'entretien. Une technologie de design est un ensemble de designs rationnels appropriés à des conditions de chaussées existantes. Il s'agit de design pour la réhabilitation des chaussées, donc déterminés à partir de design des chaussées existantes. Il s'agit en fait de modifications ou de corrections du design original qui ne répond plus aux besoins actuels.
- 2- Une méthodologie d'évaluation des revêtements existants implique des cycles d'inventaire pour la condition de surface, la profilométrie et le comportement structural, une banque permanente des données et un traitement mécanisé périodique des données. Il convient de faire une distinction entre résistance structurale, viabilité et comportement de la chaussée. La résistance structurale est la réaction immédiate de la chaussée aux charges, à l'environnement et à d'autres intrants, autrement dit aux conditions extérieures. La viabilité est l'habileté de la chaussée à servir un trafic dans sa condition actuelle. Le comportement est l'évolution de la viabilité avec les années. La viabilité ou le niveau de service donné aux usagers à un moment particulier est la caractéristique fondamentale de la chaussée.
- 3- Le feedback des données assure la mise à jour de la banque des données et est essentiel à la détermination des cycles de réhabilitation. Le feedback est la collecte et le retour des données de réaction des chaussées, à la banque des données. Il implique donc des données complémentaires à un premier inventaire routier et des données répétées. Les cycles de réhabilitation suivent le premier cycle qui est celui de la construction de la chaussée.

- 4- Les modèles d'analyse comprennent une analyse statistique, une analyse des déviations, des prévisions de survie. Un modèle comporte une logique d'ensemble, une équation générale, une variable dépendante. C'est un système qui donne une description mathématique d'une réalité concrète. Un modèle correspondra donc à la formulation logique de tout ou partie des connaissances quantitatives que nous avons sur le sujet. Un des avantages des modèles est de mettre clairement en évidence les lacunes qui existent dans nos connaissances et, par conséquent, de donner une idée précise de l'état de la technique et des recherches qui restent à effectuer.

Rappelons que:

- l'analyse statistique donne, pour l'ensemble des données du réseau routier total, du réseau routier d'une région ou d'une route en particulier, la moyenne (ordre de grandeur) et l'écart-type (dispersion) des caractéristiques évaluées dans l'inventaire;
 - pour l'analyse des déviations, il s'agit des déviations de la résistance structurale et du comportement par rapport aux prévisions de ces caractéristiques suivant le design original;
 - les prévisions de survie sont faites pour l'année terminale ou pour la durée des recouvrements, en regard du comportement des chaussées.
- 5- Pour un design rationnel de chaussée, les modèles de prédiction doivent inclure au moins trois constituants importants:
- a) des modèles reliés à la glissance et à la sécurité;
 - b) des modèles de coûts incluant le coût initial de la construction, le coût d'entretien cumulé et le coût de l'utilisateur;
 - c) des modèles de prédiction du comportement reliés à la résistance structurale, à la détérioration et au comportement.

Les mêmes modèles de prédiction applicables au design des chaussées doivent être aussi utilisés pour la réhabilitation. Pour anticiper les besoins en réhabilitation ou en entretien d'un réseau routier, on doit pouvoir prédire la condition de surface, le comportement et la résistance structurale à un certain moment de la vie des chaussées.

Les modèles de prédiction peuvent être développés de deux façons:

- a) par corrélation avec les observations et les mesures physiques (méthode empirique). Cette approche, utilisée entre autres par le groupe de l'essai AASHO, dépend de

l'habileté à trouver des combinaisons de facteurs qui peuvent statistiquement avoir une corrélation avec la variable dépendante. Les méthodes empiriques prédisent le comportement;

- b) par l'approche mécanistique. Cette méthode peut combiner la géométrie de la chaussée, les propriétés des matériaux, les charges et certains paramètres d'environnement en une équation de prédiction qui devrait avoir une meilleure fiabilité quand elle est comparée avec les modèles de prédiction strictement empiriques. Cependant, on doit noter que les modèles mécanistiques ne peuvent être reliés au comportement sans recherche additionnelle ou sans données empiriques. Les modèles mécanistiques prédisent la résistance structurale ou la détérioration. Reste encore le problème très difficile de relier la détérioration au comportement. Le problème demeure très important dans les méthodes de réhabilitation.

- 6- Les modèles de décision donnent des solutions de réhabilitation adéquates en regard des coûts et impliquent des modèles de design et des modèles économiques. Ils tiennent nécessairement compte des modèles de prédiction.

EXEMPLES DE MODÈLES

Les quelques modèles qui suivent illustrent les concepts que nous venons d'énoncer dans le cadre d'un processus global de réhabilitation.

1- Design de renforcement des chaussées:

La figure 1 donne les courbes d'analyse de l'ACBR (Association Canadienne des Bonnes routes, aujourd'hui l'Association des Routes et Transport du Canada). Ces courbes sont basées sur les relations entre la charge, l'épaisseur requise d'une chaussée et les résultats d'essai sur plaque, sur la relation établie entre les résultats d'essai sur plaque et la déflexion Benkelman maximum, et sur les résultats du projet d'évaluation ACBR. Ces courbes de la figure 1 permettent de déterminer l'épaisseur additionnelle requise en matériaux granulaires pour réduire la déflexion mesurée de la chaussée existante (prototype) à une déflexion désirée après renforcement. L'épaisseur totale de la chaussée à renforcer est égale à la somme de l'épaisseur de la chaussée existante et de l'épaisseur additionnelle (renforcement).

2- Modèles économiques:

- a) modèle du ministère des Transports de l'Ontario:

$$TC = Cc + \frac{Cr}{(1+i)^s} + \frac{Cr}{(1+i)^{s+t}} + \frac{Cr}{(1+i)^{s+2t}} + \frac{Cr}{(1+i)^{s+mt}}$$

ÉPAISSEUR GRANULAIRE ADDITIONNELLE REQUISE (po.)

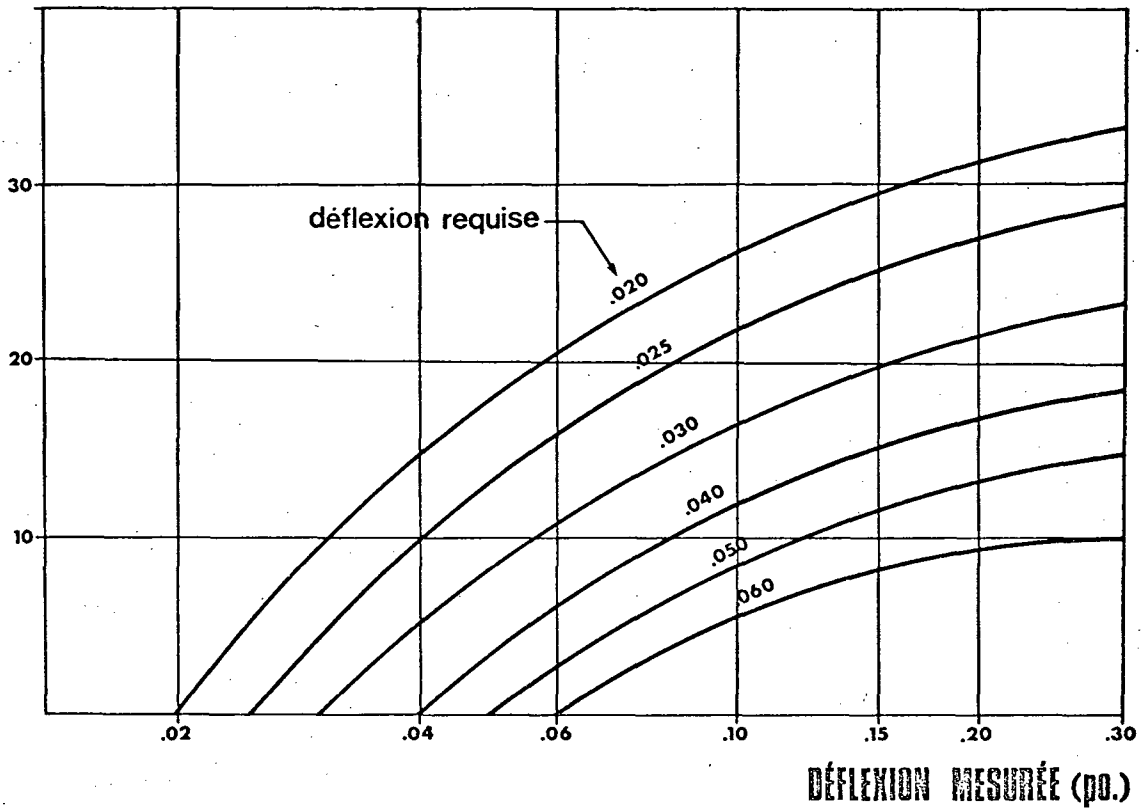


Fig. 1 MÉTHODE CGRA DE CALCUL DES RENFORCEMENTS

$$- \left(1 - \frac{Y}{t}\right) \frac{Cr}{(1+i)^n} + \sum_{a=1}^n \frac{Ma}{(1+i)^a}$$

- où:
- TC - coût total;
 - Cc - coût de la construction initiale;
 - Cr - coût de resurfaçage;
 - Ma - coût annuel de l'entretien;
 - a - nombre d'années d'entretien;
 - i - taux d'escompte;
 - m - nombre de resurfaçage dans une période d'analyse n;
 - s - vie du revêtement initial;
 - t - vie des revêtements subséquents;
 - Y - nombre d'années entre la fin du dernier revêtement et la période d'analyse;
 - (1-Y/t) - coefficient résiduel.

b) modèle du HRB (Highway Research Board, aujourd'hui Transportation Research Board):

$$AC = CRF_L [C + E_1 (PWF_A) + E_2 (PWF_{Ar}) - (1 - Y/x) (E_1 \text{ ou } E_2) PWF_{Ar}] + M$$

- où:
- AC - coût annuel;
 - CRF_L - facteur du capital recouvré pour une vie anticipée de L. années à un taux d'intérêt donné;
 - C - coût initial de la construction;
 - A - âge de rupture du revêtement initial;
 - Ar - âge de rupture du premier resurfaçage;
 - PWF - facteur actuel pour A et Ar et l'intérêt donné;
 - E_1 - coût au mille du premier resurfaçage;
 - E_2 - coût au mille du deuxième resurfaçage;
 - Y - nombre d'années entre l'âge du dernier resurfaçage et la vie anticipée de la chaussée (âge terminal);
 - x - vie estimée du dernier recouvrement;
 - M - coût au mille de l'entretien annuel.

3- Modèles de prédiction du comportement:

a) modèle tiré de l'essai AASHO:

$$PSI = A_0 + A_1 \log (1 + \overline{SV}) + A_2 \overline{RD}^2 + B_1 \sqrt{C-P}$$

- où:
- PSI = indice de viabilité à un moment donné (present service - ability index);
 - A_0, A_1 - coefficients déterminés par une analyse de régression;
 - A_2, B_1 -
 - \overline{SV} - variance moyenne de la pente (uni de la surface);
 - \overline{RD} - profondeur moyenne des ornières;
 - C - indice de fissuration du revêtement;
 - P - indice de rapiéçage.

NOTE: Ce modèle n'est valable que pour les chaussées souples.

b) modèle découlant de l'inventaire structural des routes au Québec*:

$$Kr = A_0 + A_1 \log \text{Age} + A_2 \sqrt{\sigma d} + A_3 \sqrt{F + R + D} + A_4 \bar{X}$$

* Modèle à l'étude mais non adopté officiellement par le ministère des Transports.

- où: Kr - coefficient de roulement déterminé par les essais avec le roulemètre ("car road meter");
- A_0, A_1, A_2
 A_3, A_4 - coefficients déterminés par une analyse de régression;
- σ_d - écart-type de la déflexion Benkelman;
- F - cote de la fissuration;
- R - cote du rapiéçage;
- D - cote du drainage;
- \bar{X} - déflexion Benkelman moyenne.

COMPORTEMENT ET REBONDISSEMENT

La figure 2 est tirée d'une expérience ontarienne, le "Brampton Road Test". Cette figure donne la corrélation entre l'indice de confort de roulement à un certain moment de la vie de la chaussée et la déflexion caractéristique ($\bar{X} + 2\sigma$) initiale. La déflexion Benkelman a été prise au printemps 1966 et l'indice de confort de roulement (Present Performance Rating) a été compilé à l'aide d'un jury durant l'été 1970 après 300,000 applications de charge.

L'intérêt est de comparer la viabilité actuelle avec la déflexion initiale (immédiatement après la construction de la chaussée ou à sa mise en service). A une charge cumulée donnée, plus la déflexion initiale est faible, plus la viabilité actuelle sera élevée; d'où l'importance d'un bon design approprié à la classe de route et au trafic prévu. A remarquer sur cette figure 2 le coefficient de corrélation relativement élevé (0.8423) bien que les sections étudiées soient de construction différente.

La figure 3 est construite à partir de la figure 2. Le graphique aide à fixer les niveaux de viabilité acceptable et terminal pour les classes de routes appropriées, en fonction des applications de charge. Un des critères de base est celui de la CGRA (ACBR). Sur la figure 3, les seuls points déterminés sont ceux suivant la ligne de 300,000 applications de charge (voir fig. 2). Les courbes sont tracées en reliant la viabilité initiale à celle déterminée après 300,000 applications pour les déflexions Benkelman choisies. Une meilleure estimation du comportement pourra être faite en déterminant la viabilité à différentes applications de charge, en reconstruisant en somme différentes figures similaires à la figure 2 (une pour chaque groupe d'applications de charge) qui serviront à refaire la figure 3 et sur laquelle les courbes seront plus près de la réalité. Cela suppose une banque de données assez complète sur diverses structures de chaussées, leur résistance structurale et le trafic qu'elles supportent. Cette banque de données se constituera à partir de l'inventaire structural des routes et d'un inventaire de la circulation. Ces inventaires devront être cycliques et permanents.

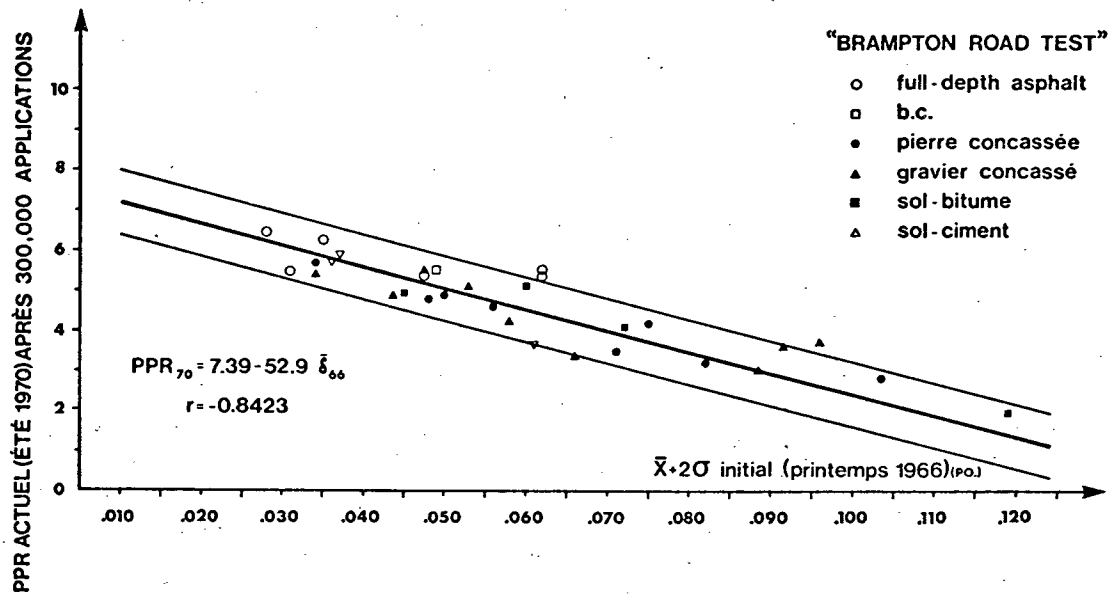


Fig. 2 LE REBONDISSEMENT COMME PRÉDICTION DU COMPORTEMENT

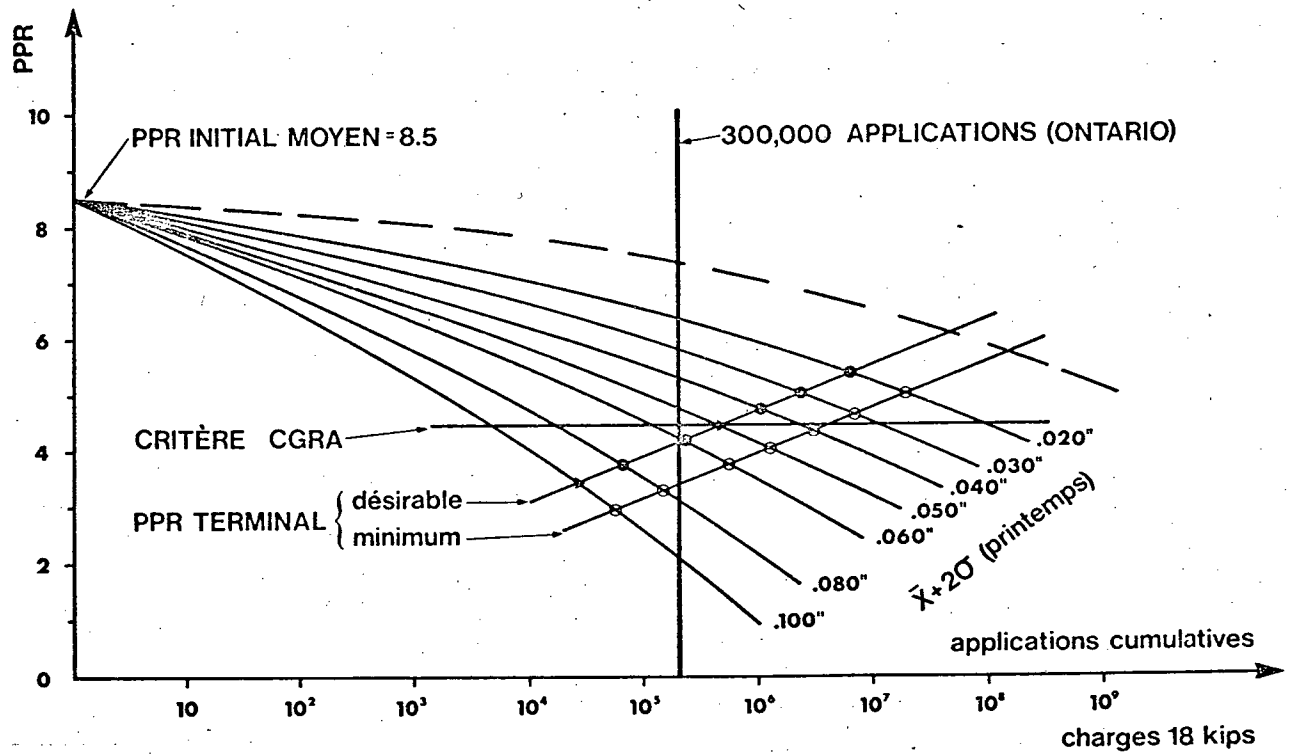


Fig. 3 COMPORTEMENT ESTIMÉ EN FONCTION DES REBONDISSEMENTS ET DES CHARGES CUMULATIVES

LA RÉHABILITATION APPLIQUÉE SUIVANT CERTAINS CRITÈRES DE DÉCISION

Le tableau 1 résume les principales corrections ou améliorations aux chaussées par quelques types de réhabilitation. Ce tableau, bien que sommaire, donne une excellente idée des principaux défauts à corriger et souligne l'importance d'un inventaire structural cyclique du réseau routier intégré à un processus de gestion. Si on veut se servir des données de l'inventaire routier pour planifier une réhabilitation adéquate, il nous faut établir des critères de décision pour la viabilité, la résistance structurale, la condition de surface et la glissance. Ces critères de décision sont en définitive les niveaux de qualité des caractéristiques structurales relevées. Ces critères de décision aideront à construire le modèle de décision qui est un éventail de solutions impliquant un choix. Le modèle de décision tient compte des modèles de prédiction.

TABLEAU 1
CORRECTIONS APPORTÉES PAR CERTAINS TYPES DE RÉHABILITATION

RÉHABILITATION	CORRECTIONS À:
Réparations locales et rapiéçage	Défauts locaux, bris, soulèvements
Amélioration du drainage	Mauvais drainage, accotements faibles, déflexion élevée
Couches d'usure	Mauvaise viabilité, déflexion relativement élevée
Traitements de surface	Mauvaises conditions de surface, glissance élevée
Renforcements	Déflexion élevée, effets dus aux charges lourdes, trafic augmenté
Stabilisation	Mauvais sous-sol, manque de matériaux de construction
Reconstruction	Conditions structurales extrêmes, bris importants, fondations non uniformes, trafic augmenté

Les critères de décision ou niveaux de qualité seront déterminés à la fois par une étude statistique, par une étude des coûts et par une étude des conséquences de détérioration. La distribution de fréquence des caractéristiques structurales et de viabilité aidera à fixer, par les moyennes et les écarts-types, soit pour l'ensemble du réseau, soit par région, des niveaux de viabilité et de résistance structurale. L'avantage de cette mé-

thode est de pouvoir comparer les caractéristiques des régions entre elles et par rapport aux caractéristiques du réseau de la province. Une étude économique, en montrant les conséquences monétaires de la décision basée sur les niveaux de qualité établis par l'étude statistique, viendra raffiner ces critères de décision. Finalement, l'étude des conséquences de détérioration, par l'étude de l'évolution des caractéristiques dans le temps (comportement) et l'étude des déviations par rapport aux modèles de prédiction, viendra corriger le choix final.

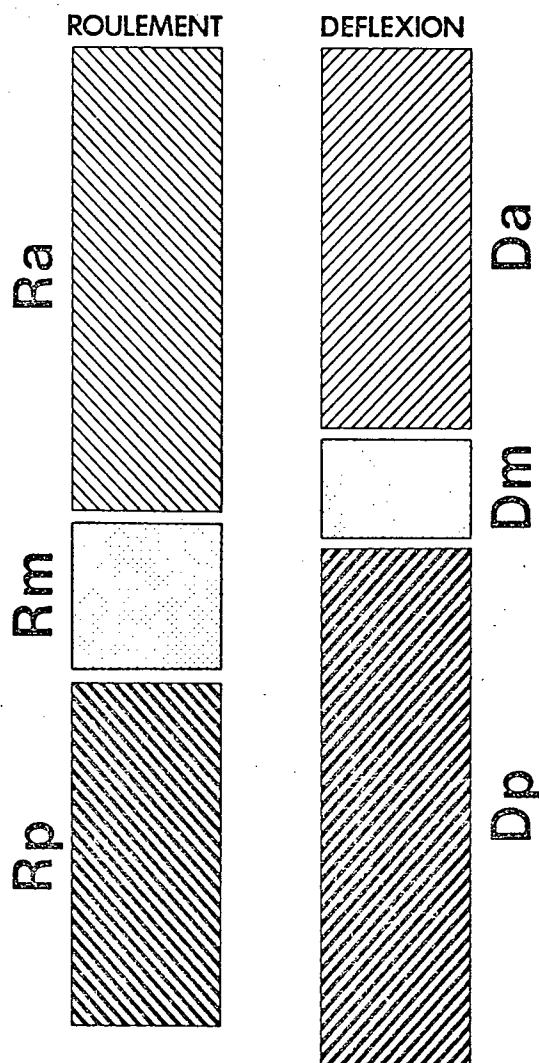


Fig. 4 DÉTERMINATION DES ZONES DE COMPORTEMENT.

Une solution originale est proposée sur la figure 4. On y a choisi les deux caractéristiques principales de la chaussée: le coefficient de roulement (K_r) pour la viabilité et la déflexion caractéristique ($\bar{X} + 2\sigma$) pour la résistance structurale. Il s'agit de répartir les sections de chaussées inventoriées en trois zones: acceptable, marginale et prioritaire, pour le roulement et pour la déflexion. Ainsi, Ra signifie: zone de roulement acceptable, Rm: zone de roulement marginale, Rp: zone de roulement prioritaire; Da: zone de déflexion acceptable, Dm: zone de déflexion marginale et Dp: zone de déflexion prioritaire. Les échelles de valeur vont de 100 à 22 pour le coefficient de roulement (K_r) et de 0 à 150 et plus pour la déflexion caractéristique ($\bar{X} + 2\sigma$), c'est-à-dire de très bon à très mauvais. Les niveaux supérieurs des zones acceptables et inférieurs des zones prioritaires étant ainsi fixés, il s'agira de préciser les niveaux de qualité qui délimiteront les zones marginales des zones acceptables et des zones prioritaires dans le cas du roulement (viabilité) et dans le cas de la déflexion (résistance structurale). Ceci peut être fait par compilation statistique et par l'étude des courbes de viabilité en fonction de la déflexion et des charges cumulées (fig. 3).

En combinant le roulement et la déflexion en neuf zones possibles,

le tableau II élabore des stratégies de réhabilitation en solutions immédiates et solutions à long terme. Pour les solutions à long terme, on doit tenir compte des autres données de surface recueillies dans l'inventaire: la cote de fissuration, la cote de rapiéçage et la cote de drainage. Ces solutions de réhabilitation proposées dans le tableau II seront confrontées avec les coûts de réalisation et avec le jugement des gestionnaires: les adjoints à l'Entretien, les directeurs de régions et les chefs de districts.

Enfin, les solutions résumées dans le tableau III sont complétées d'après le tableau II. On a retenu les cinq solutions possibles suivantes: chaussée acceptable, entretien mineur, couche d'usure, renforcement, reconstruction. Ces solutions seront étudiées en comparant les coûts et le comportement anticipé pour le réseau routier total, pour le réseau d'une région et pour un projet particulier. En répartissant les solutions de réhabilitation en pourcentages pour les routes du Québec, on peut d'une part évaluer les budgets globaux de réhabilitation pour le réseau routier total et répartir les dépenses, et d'autre part raffiner les critères de décision si ceux-ci sont trop sévères et justifier un ordre de priorités dans les routes à réhabiliter.

TABLEAU II
STRATÉGIES DE RÉHABILITATION CONÇUES À L'AIDE DES ZONES
DE COMPORTEMENT DE LA FIGURE 4

Zones possibles	Solutions immédiates	Solutions à long terme	Dépendant de:
1- Ra Da	Acceptable	Entretien mineur	Fissuration
2- Ra Dm	Entretien mineur	Couche d'usure	Fissuration Rapiéçage
3- Ra Dp	Couche d'usure	Réparations locales, drainage	Rapiéçage Note de drainage
4- Rm Da	Acceptable	Couche d'usure	Fissuration Rapiéçage
5- Rm Dm	Couche d'usure	Renforcement Drainage	Fissuration, rapiéçage, note de drainage
6- Rm Dp	Renforcement	Réparations locales, drainage	Rapiéçage Note de drainage
7- Rp Da	Couche d'usure	Renforcement Drainage	Rapiéçage Note de drainage
8- Rp Dm	Renforcement	Reconstruction Drainage	Fondations Note de drainage
9- Rp Dp	Reconstruction	Nouvelle route	Circulation

TABLEAU III
CONSEQUENCES DES SOLUTIONS DE RÉHABILITATION ADOPTÉES
À L'AIDE DES CRITÈRES DE DÉCISION

Solutions envisagées	Pourcentage des routes impliquées:				
	Auto- routes	Provin- ciales	Régio- nales	Munici- pales	Réseau total
Acceptable	----	----	----	----	----
Entretien mineur	----	----	----	----	----
Couche d'usure	----	----	----	----	----
Renforcement	----	----	----	----	----
Reconstruction	----	----	----	----	----

CONCLUSION

Les points suivants résument les idées maîtresses de cet article:

- 1- La réhabilitation devrait être cédulée pour corriger ou prévenir l'apparition d'une condition de chaussée indésirable.
- 2- Les données d'input et les critères de comportement et de viabilité conduisent à l'élaboration des stratégies de réhabilitation.
- 3- La réhabilitation doit être limitée, par définition, aux actions requises par des décisions relevant de la gestion et de l'ingénierie.
- 4- Un processus global de réhabilitation nécessite une technologie de design, une méthodologie d'évaluation des revêtements existants, un feedback des données et des modèles d'analyse, de prédiction et de décision.
- 5- Pour un design rationnel de chaussée, les modèles de prédiction doivent inclure des modèles reliés à la glissance et à la sécurité, des modèles de coûts et des modèles de prédiction du comportement.
- 6- Les mêmes modèles de prédiction applicables au design des chaussées doivent être aussi utilisés pour la réhabilitation.
- 7- Pour planifier une réhabilitation adéquate, il faut établir des critères de décision pour la viabilité, la résistance structurale, la condition de surface et la glissance.
- 8- Les critères de décision seront déterminés par une étude statistique, une étude des coûts et une étude des conséquences de détérioration.

- 9- On a retenu les cinq solutions suivantes: chaussée acceptable, entretien mineur, couche d'usure, renforcement, reconstruction.
- 10- Les solutions de réhabilitation seront confrontées avec les coûts de réalisation et avec le jugement des gestionnaires.

Plus vite la réhabilitation sera intégrée dans un processus logique de gestion routière, plus facile sera l'entretien des routes, meilleures seront les chaussées et les budgets utilisés à meilleur escient.

MINISTÈRE DES TRANSPORTS



QTR A 102 160