



RECHERCHES TRANSPORT

BULLETIN D'INFORMATION SCIENTIFIQUE

Volume thématique no 12 : juillet 1993

OPTIMISATION DU DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES DE CHAUSSÉES

Nelson Rioux

Chef de la Section reconnaissance des tracés
Service des sols et chaussées
Transports Québec

MINISTÈRE DES TRANSPORTS
CENTRE DE DOCUMENTATION
700, BOUL. RENÉ-LÉVESQUE EST,
21^e ÉTAGE
QUÉBEC (QUÉBEC) - CANADA
G1R 5H1

INTRODUCTION

Dans les dernières années, les organisations routières ont dû faire face aux problèmes d'un réseau vieillissant soumis au trafic sans cesse croissant. De plus, dans un contexte où les disponibilités budgétaires sont limitées, les interventions au chapitre du développement et de la réfection du réseau doivent être ajustées pour tenir compte de ces nouveaux impératifs.

Les concepteurs se voient dans l'obligation d'accentuer leurs efforts en vue de rationaliser leurs approches tout en mettant l'accent sur la qualité des interventions afin de réduire le plus possible les besoins en matériaux. Les sources d'approvisionnement en matériaux de qualité s'épuisent. En outre, la disposition des rebuts provenant des chantiers et de l'industrie a des conséquences sur l'environnement. De nouveaux procédés de traitement et de recyclage doivent donc être développés.

Il est fort probable que la solution n'est pas unique. Les expériences vécues et les efforts de recherche, un peu partout dans le monde, ont permis de faire progresser considérablement l'état des connaissances. Des techniques et des produits nouveaux ont fait leur apparition. Des méthodes de conception de structures de chaussées ont été améliorées jusqu'à récemment.

CANQ
TR
248
V.12

Québec 

Pour faire face aux besoins d'aujourd'hui, il est essentiel qu'une organisation routière, comme le ministère des Transports, adopte des méthodes de dimensionnement rigoureuses, adaptées au contexte et suffisamment souples pour permettre de modifier, en toute connaissance de cause, les éléments composant la structure de chaussée.

Afin de bien situer le processus de dimensionnement, les principaux éléments de mécanique des chaussées sont ici passés en revue. Il sera ensuite possible d'en déduire la nécessité d'utiliser de telles méthodes et de mesurer le potentiel qu'elles représentent. Ces principes sont tout aussi valables pour les nouvelles constructions que pour la réfection du réseau.

LES BASES DU DIMENSIONNEMENT

Composition et rôle des couches

Sous l'apparence d'un résultat relativement simple comportant quelques couches de matériaux recouvrant un sol support, les structures de chaussées constituent, malgré tout, des ensembles dont l'analyse est très complexe. De nombreuses variables, qui peuvent se combiner de multiples façons, influencent la conception et la performance des chaussées.

Pour les chaussées souples qui constituent la grande majorité du réseau, les couches composant la structure de chaussée sont représentées à la figure 1. Chacune d'elles joue un rôle déterminant, lors de l'exécution des travaux et, sur la performance ultérieure (tableau 1). L'infrastructure n'est pas une couche en soi, mais ses caractéristiques influencent considérablement la conception d'une chaussée souple. Les matériaux choisis doivent présenter des propriétés qui les rendent aptes à jouer leur rôle. Sur la base de ces propriétés, il est ensuite possible de procéder au dimensionnement de la structure de chaussée.

TABLEAU 1 : FONCTIONS DE COUCHES COMPOSANT LA STRUCTURE DE CHAUSSEES	
Revêtement :	<ul style="list-style-type: none"> - supporter la circulation et distribuer les charges ; - sceller la surface et protéger la fondation ; - assurer l'adhérence des pneus à la chaussée ; - présenter une surface unie, confortable et sécuritaire.
Fondation (une ou deux couches selon le cas) :	<ul style="list-style-type: none"> - répartir les charges ; - supporter le revêtement et faciliter sa mise en oeuvre ; - réduire les effets du gel ; - poser une couche de roulement provisoire.
Sous-fondation :	<ul style="list-style-type: none"> - drainer les fondations ; - répartir les charges sur le sol support ; - réduire les effets du gel ; - prévenir la contamination par le sol support.

Les phénomènes de fatigue et la grande sollicitation du trafic

Chacune des couches constituant la chaussée doit être en mesure de supporter et de distribuer les contraintes qui lui sont transmises afin que la surface de roulement ne présente pas de déformations excessives à l'intérieur de la période pour laquelle cette chaussée a été conçue.

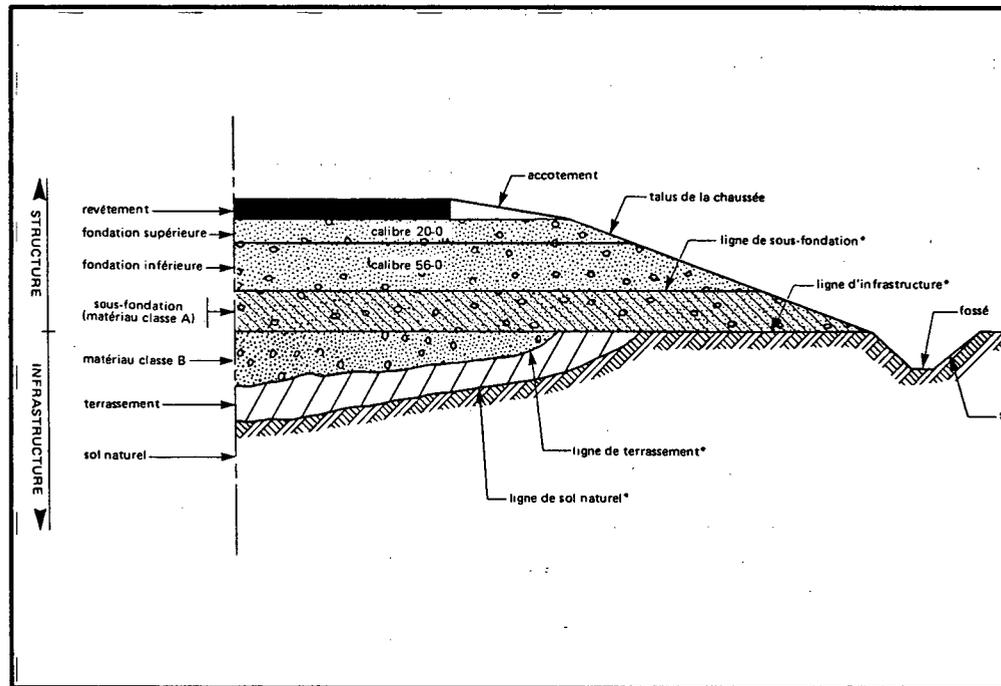
Une charge appliquée sur une roue se distribue sous forme d'une contrainte en profondeur suivant les courbes représentées à la figure 2. En présence de plus d'une couche, la distribution des contraintes est influencée par la rigidité de chacune des couches. Plus la couche est rigide (module d'élasticité élevé), plus la contrainte transmise à la couche sous-jacente est réduite.

DOR-CEN-MO10

CAUQ
TR
248
v. 12

FIGURE 1

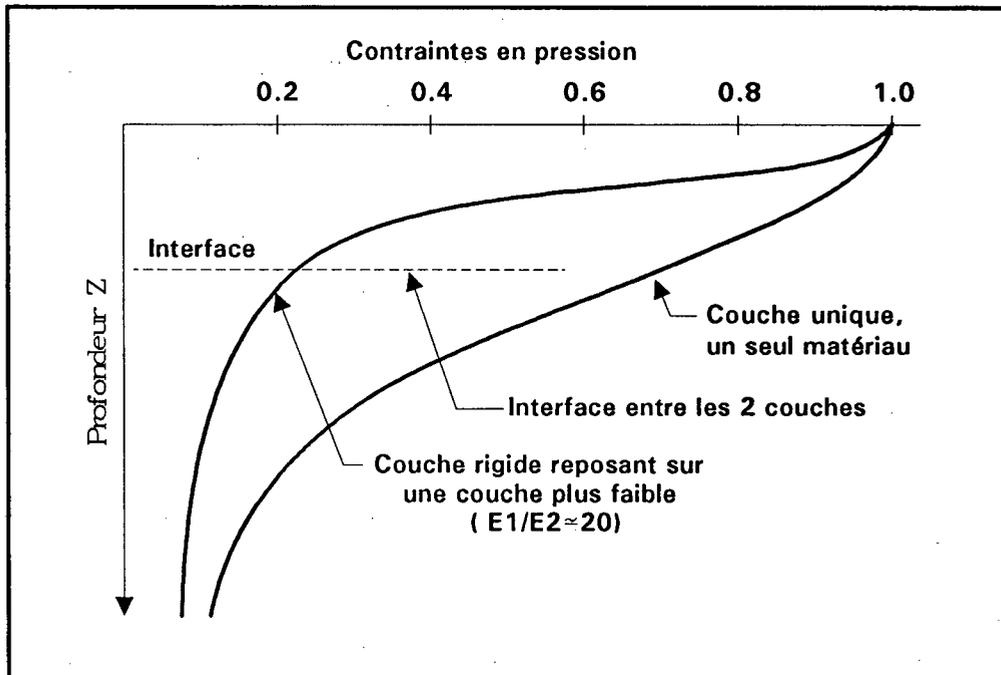
Terminologie de chaussée



Source: Normes routières, Transports Québec [5]

FIGURE 2

Distribution des contraintes de pression en profondeur



Source: Modifié de Yoder [2]

Les matériaux de la chaussée ne sont pas parfaitement élastiques. Les déformations ne sont donc pas supprimées en totalité après chaque passage d'une charge et, il en résulte une déformation permanente (figure 3). Ces dommages sont cumulatifs dans le temps (Loi de Miner). Cette accumulation progressive causée par le passage répété des véhicules se nomme «phénomène de fatigue». Les dégradations, bien qu'infimes sous chaque passage, deviennent significatives après de nombreux passages.

Chacune des couches doit être dimensionnée de façon à limiter le phénomène de fatigue. Les niveaux les plus critiques se situent à la jonction du béton bitumineux et de la fondation ainsi qu'au contact entre le sol support et la structure de chaussée. La contrainte ou la déformation admissible sur une couche pour chacun des passages d'une charge peut être déterminée à partir d'essais dont les résultats sont représentés sous la forme d'une courbe similaire à celle de la figure 4. Plus le nombre d'applications de la charge est élevé pour une période de temps déterminée, plus la contrainte admissible pour chaque passage doit diminuer de façon à ce que la gravité des déformations n'excède pas les seuils fixés pour cette période. La conception structurale consiste alors à s'assurer que la contrainte transmise à un niveau donné, sous la surface, n'excède pas la contrainte admissible.

Les dégradations apparaissent sous la forme de fissures créées par les contraintes en tension à la base du revêtement bitumineux et par la création d'ornières résultant des contraintes en pression sur l'ensemble du système (figure 5). Les sollicitations affectent aussi l'uni de la chaussée.

Pour évaluer les dommages causés par la circulation, il est nécessaire d'estimer les sollicitations totales correspondantes au trafic prévu pour toute la période considérée. Les effets des véhicules légers étant négligeables, la sollicitation totale est établie à partir du nombre et de la composition du trafic lourd. À l'aide de relations préétablies, les différentes charges et configurations d'essieux sont converties en nombre d'équivalents de passage d'un essieu de référence causant le même dommage. Ainsi, le passage d'un camion peut correspondre à un certain nombre de fois le passage d'un essieu de référence. Ce nombre est connu sous le terme «coefficient d'agressivité». Une valeur moyenne représentative du trafic pour une route donnée est utilisée dans les calculs.

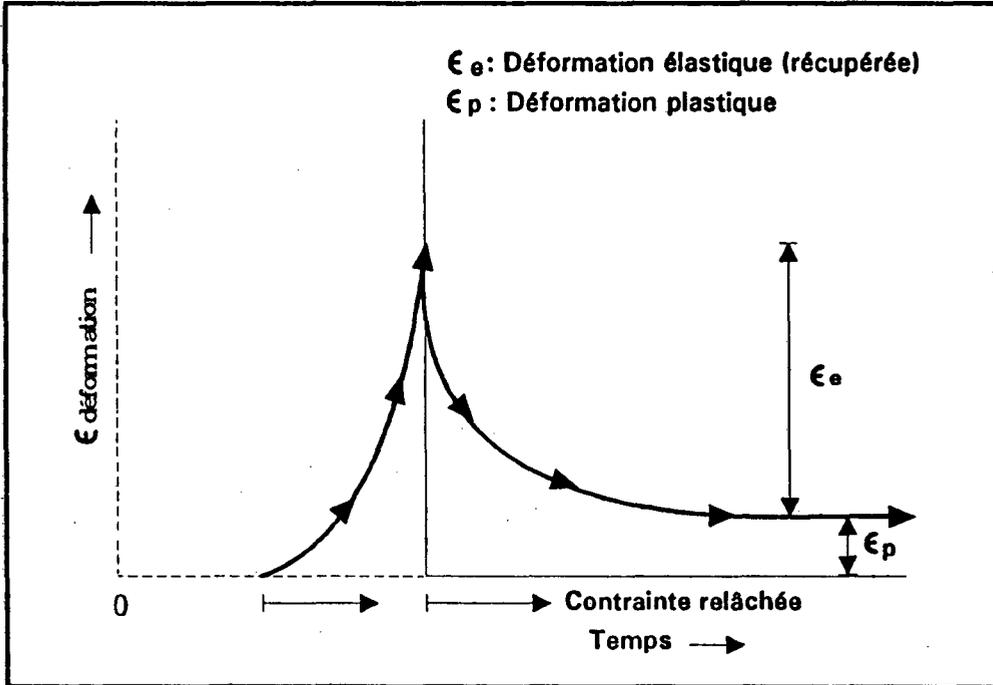
Les effets du climat

Le climat du Québec, en raison des effets combinés des précipitations et de la température, est parmi les plus rigoureux au monde. Le gel, les écarts thermiques et l'humidité ont des conséquences majeures sur le comportement des chaussées.

Les cycles de gel et de dégel rendent les chaussées fragiles. Le gel provoque des soulèvements causés par la solidification de l'eau interstitielle et par la croissance des lentilles de glace dans les sols gélifs. Au moment du dégel, la glace interstitielle contenue dans la fondation et la sous-fondation se transforme en eau. Cette eau et les nouvelles eaux d'infiltration demeurent emprisonnées dans les niveaux supérieurs de la chaussée

FIGURE 3

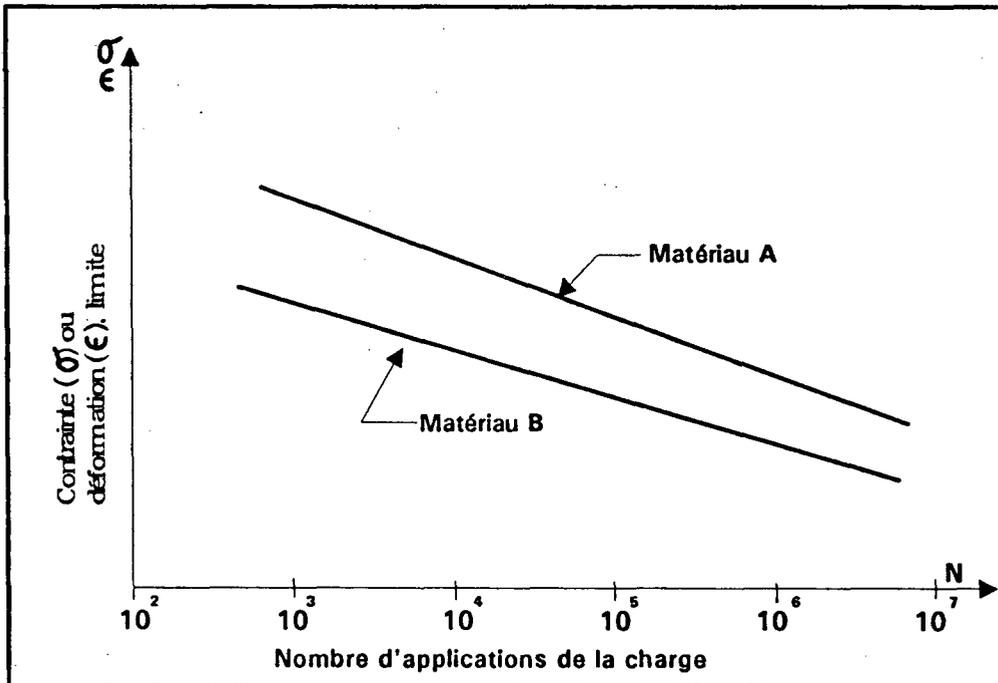
Déformation de la chaussée sous contrainte



Source: Modifié de Yoder [2]

FIGURE 4

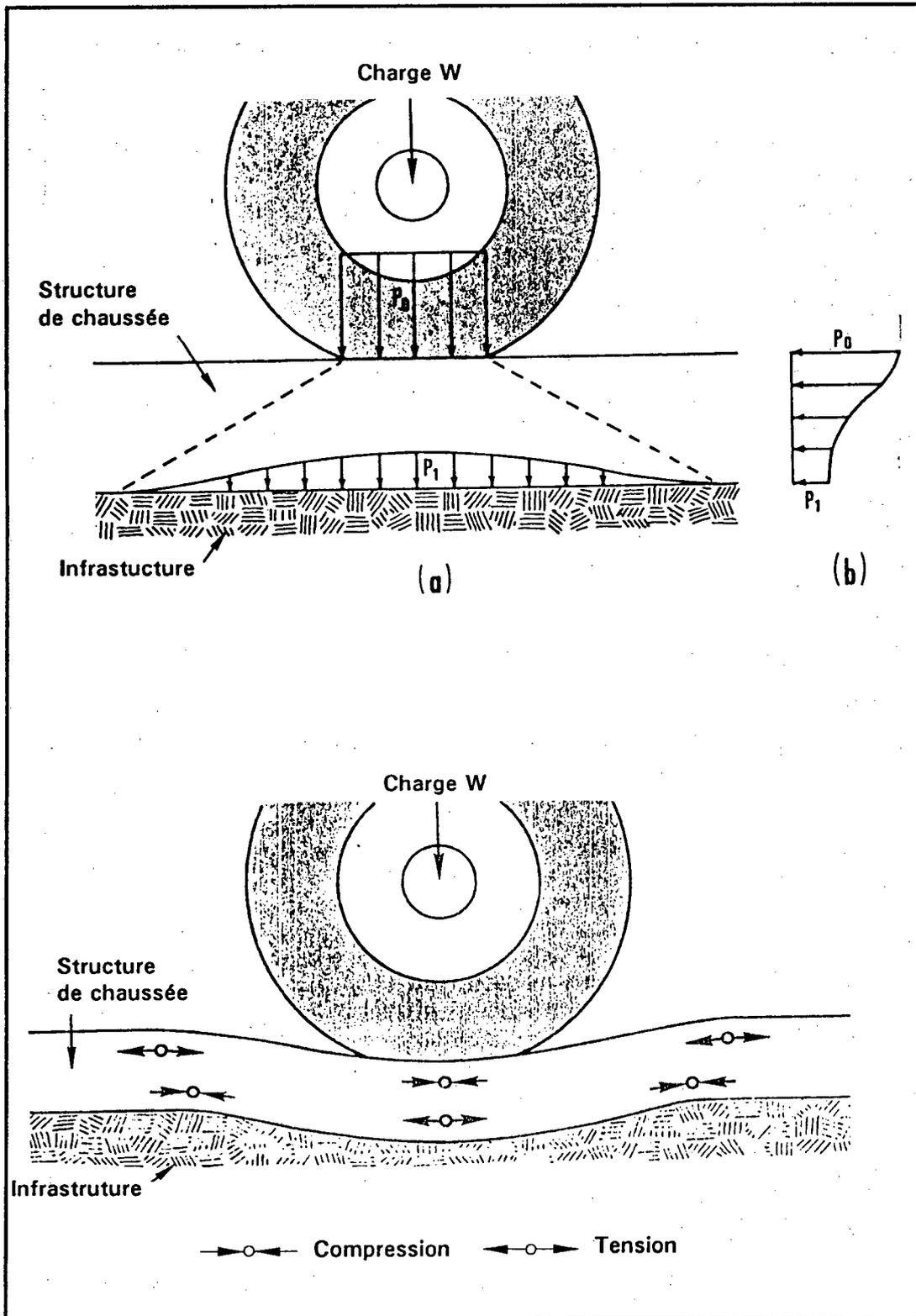
Contraintes et déformations admissibles



Source: Modifié de Yoder [2]

FIGURE 5

Distribution des contraintes sous la surface d'une chaussée



Source: Asphalt Institute [4]

tant que les horizons sous-jacents demeurent gelés, ce qui conduit à une réduction de la capacité portante de la chaussée.

Au moment du dégel des sols d'infrastructure qui sont plus faibles et aussi plus abondants en glace, la perte de capacité de support atteint un stade encore plus critique (figure 6). Ces variations dans la capacité de support des différentes couches sont prises en considération dans la conception.

Pour contrer les soulèvements différentiels majeurs causés par le gel, une protection complète est appliquée sous forme de transition jusqu'à la ligne de gel (figure 7). Pour les soulèvements différentiels mineurs qui risquent d'affecter la surface et pour réduire l'ouverture des fissures, une protection partielle constituée de matériaux non gélifs est appliquée au niveau de la structure de chaussée. Cette protection partielle contribue, en même temps, à éloigner de la surface les sols faibles. De telles pratiques sont courantes dans les pays nordiques.

La température influence aussi les propriétés des revêtements bitumineux. Ces derniers présentent une rigidité beaucoup plus faible lorsque leur température augmente. Ils sont alors plus susceptibles au fluage tout en distribuant moins efficacement les contraintes.

Le dimensionnement des structures de chaussées

La qualité d'une chaussée se mesure selon un indice de confort (ou indice de viabilité PSI) qui se dégrade avec le temps (figure 8). Cet indice est principalement conditionné par l'uni et dans une moindre mesure, par l'orniérage, la fissuration et le rapiéçage.

Le dimensionnement consiste donc à concevoir une chaussée qui, à la fin d'une période donnée, présentera un indice de confort choisi, compte tenu d'un niveau de risque préétabli. En premier lieu, cette conception doit s'appuyer sur une méthode éprouvée et reconnue. La méthode AASHTO, révisée en 1986, a été retenue pour le dimensionnement des chaussées sur le réseau provincial. La première méthode, introduite en 1961, fait suite aux corrélations établies à partir des résultats statistiques obtenus sur un site de plus de 800 planches d'essai grandeur réelle. Elle a ensuite été améliorée en fonction de l'évolution des connaissances. Nous avons cependant apporté certaines adaptations pour tenir compte de nos conditions climatiques et du comportement de nos chaussées. Cette méthode sera sûrement améliorée avec les résultats du programme nord américain *Strategic Highway Research Program* (SHRP), auquel participe le Québec.

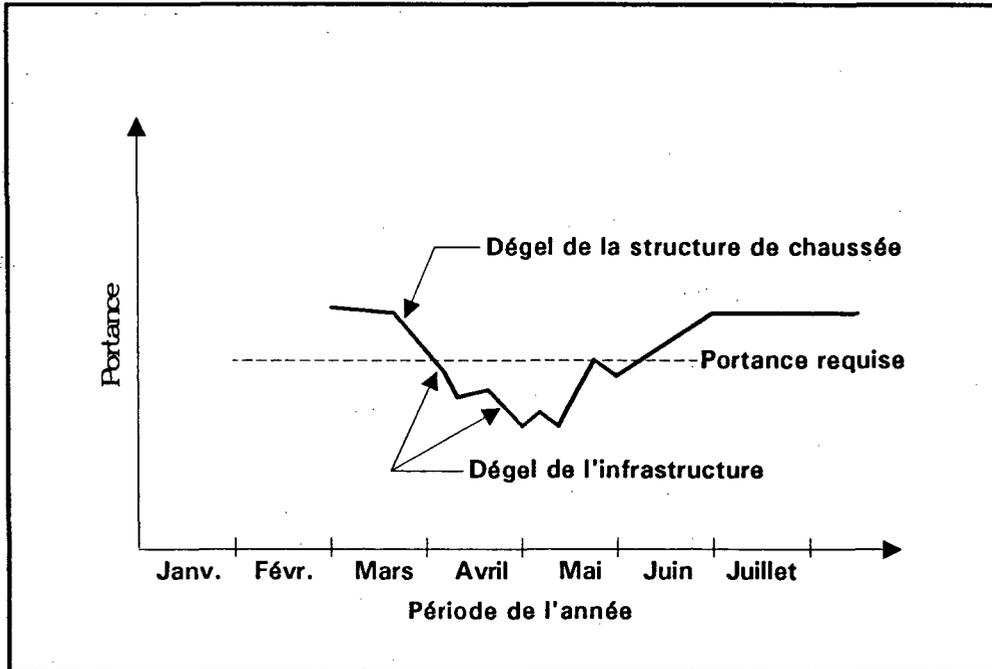
La conception s'effectue en deux grandes étapes :

- le dimensionnement structural ;
- la protection contre le gel.

Le dimensionnement structural précise les épaisseurs requises pour limiter la fatigue des chaussées en fonction de la qualité des matériaux. Pour établir le concept final, divers éléments indiqués au tableau 2 font partie

FIGURE 6

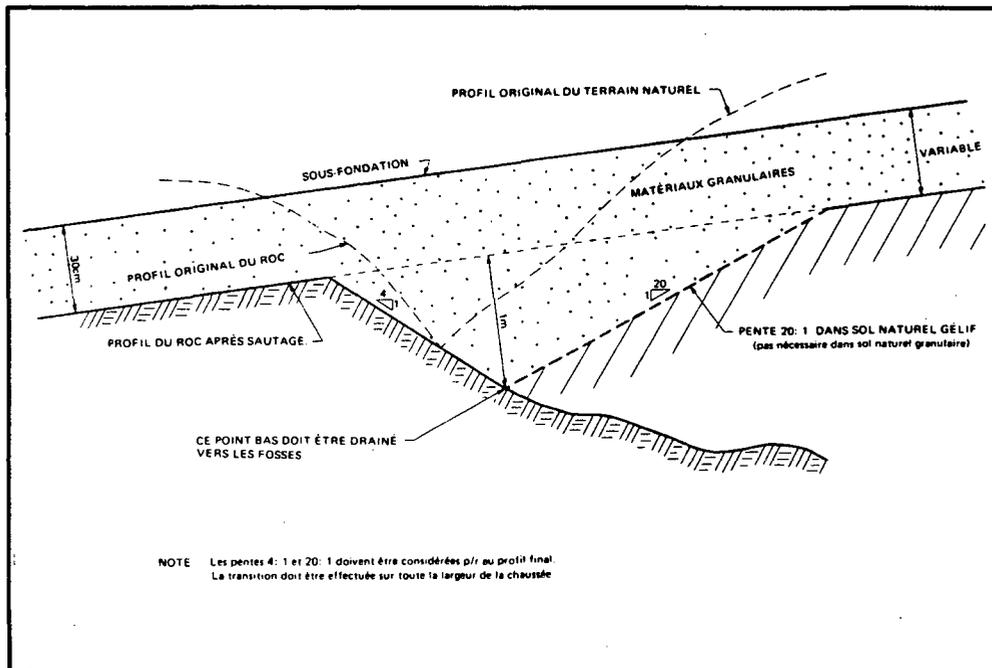
Évolution de la capacité de support



Source: Interne MTQ

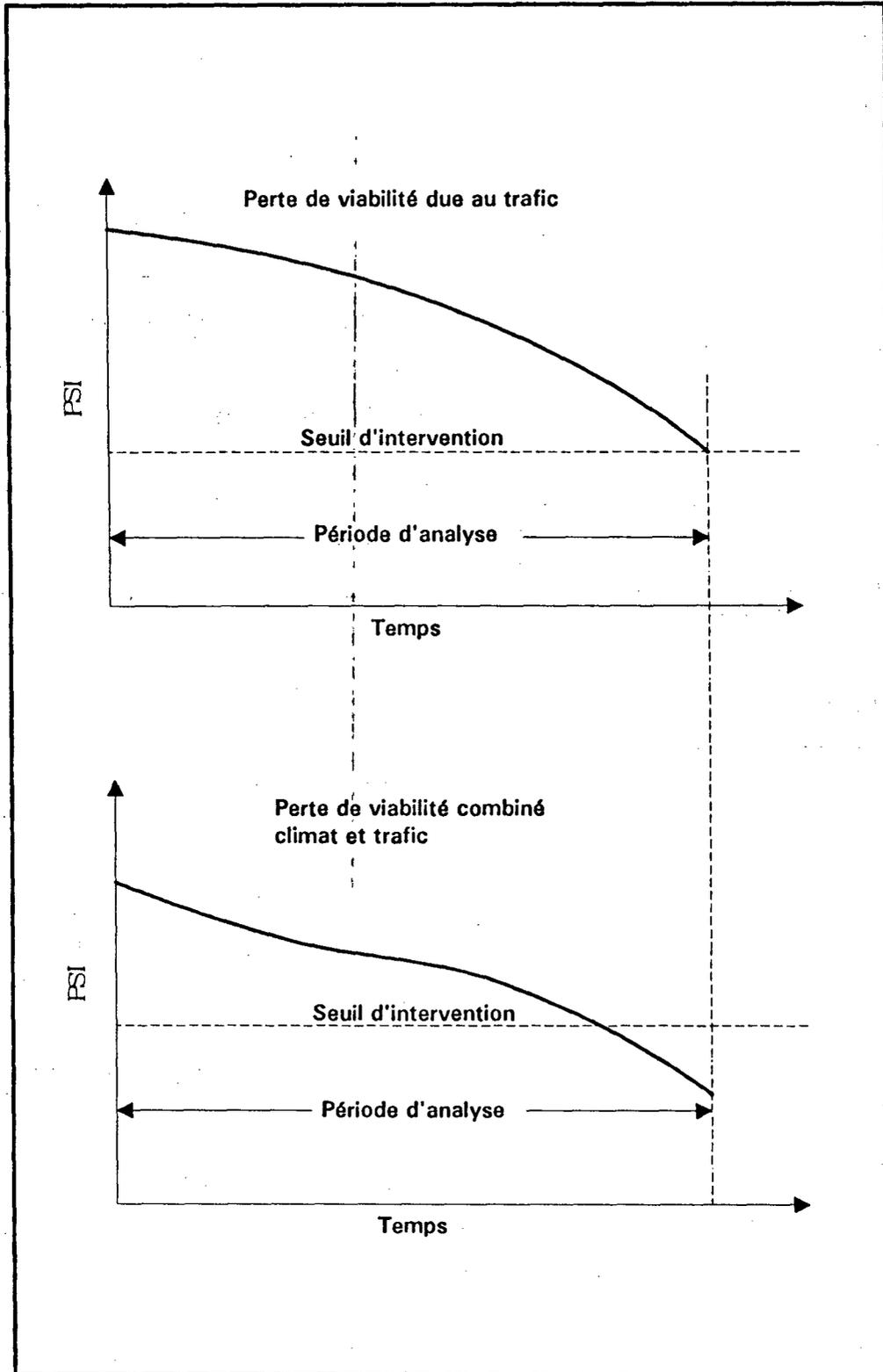
FIGURE 7

Exemple de transition, cas sol-roc



Source: Tessier [3]

FIGURE 8
Evolution de l'indice de viabilité (PSI)



Source: AASHTO [1]

de la méthode. Les buts poursuivis sont établis suivant le débit de circulation et la catégorie de route. Les méthodes excluent les problèmes potentiels portant sur la stabilité et la fissuration thermique des revêtements. Ces problèmes doivent être réglés au préalable par des exigences appropriées sur les mélanges bitumineux.

TABLEAU 2 : ÉLÉMENTS NÉCESSAIRES AU DIMENSIONNEMENT, MÉTHODE AASHTO 1986	
Objectifs visés :	<ul style="list-style-type: none"> - niveau de risque ; - période sous analyse avant une intervention majeure ; - indice de confort à la fin de la période.
Éléments calculés :	<ul style="list-style-type: none"> - sollicitation totale par le trafic ; - capacité de drainage de la structure de chaussée.
Propriétés des matériaux :	<ul style="list-style-type: none"> - sols support ; - couches composant la structure de chaussée.

Une fois le calcul structural complété, l'épaisseur totale de structure de chaussée obtenue est ensuite comparée à l'épaisseur requise pour la protection contre le gel. L'épaisseur la plus grande conditionne le dimensionnement. Si la protection contre le gel l'emporte, l'épaisseur de sous-fondation calculée à la première étape est augmentée pour assurer la protection contre le gel.

Des modèles de conception analytiques ont aussi été largement développés depuis les années 1970. Ces modèles proposent une compréhension plus fondamentale des phénomènes qui se produisent à l'intérieur d'une chaussée. Ils peuvent être particulièrement utiles pour comparer les matériaux ou la sollicitation relative des véhicules. Ils nécessitent cependant un calage par rapport au comportement réel, propre à un environnement en particulier, si on désire les utiliser aux fins de conception.

INTÉGRATION DES MÉTHODES DANS LA PRATIQUE

Révision des structures de chaussées

Dans la conception des plans et devis, le ministère des Transports du Québec utilisait, jusqu'à récemment, les structures de chaussées reproduites dans ses cahiers des normes. À la suite du processus de révision des normes qui a été engagé depuis les trois dernières années, une révision de nos besoins et de nos exigences dans ce domaine a été entreprise pour les raisons suivantes :

- ***Augmentation considérable de la sollicitation par le trafic lourd***

Depuis les quinze dernières années, les résultats combinés du nombre de camions et des charges moyennes par essieu ont eu comme effet d'augmenter de plus du double les contraintes que subissent les chaussées. Même s'il est permis d'anticiper que le taux de croissance de la sollicitation n'augmentera pas avec la même intensité dans l'avenir, il n'en demeure pas moins que nos structures types doivent être révisées pour mieux refléter la réalité d'aujourd'hui.

- ***Pratiques en usage dans d'autres administrations routières***

Après l'examen des pratiques au Québec, dans les autres provinces canadiennes et dans les pays présentant des conditions similaires aux nôtres, nous avons constaté des différences en matière d'épaisseurs et des matériaux utilisés. Nous avons donc été amenés à examiner les raisons qui justifiaient leurs démarches et à procéder à une analyse approfondie de nos propres façons de faire.

- ***Évolution des connaissances***

Cette évolution a débouché sur le développement de méthodes plus souples et plus précises en relation avec les comportements observés sur les chaussées. L'arrivée de nouveaux produits ainsi que des appareils de mesure et de vérification plus performants ont aussi contribué à créer des moyens favorables à l'évolution des connaissances.

- ***Adaptation des concepts de chaussée***

Les anciennes normes ne permettaient pas d'ajuster les structures de chaussée au trafic lourd sur un projet; elles ne permettaient pas non plus de les adapter aux conditions climatiques dans une région donnée. En modifiant nos méthodes, il est alors possible de structurer la conception de façon à rationaliser les matériaux tout en tenant compte de leur qualité et des besoins locaux.

Les méthodes de conception décrites auparavant servent de base à l'élaboration des structures de chaussées révisées tout en s'assurant que les résultats obtenus soient cohérents avec nos pratiques et les comportements observés dans le passé. Tout au long du processus, des vérifications sont aussi faites avec les règles en usage dans d'autres organisations routières afin de s'assurer du bien-fondé des éléments utilisés et des valeurs obtenues. Finalement, la démarche est complétée par une analyse de coûts pour mieux cerner les impacts financiers.

Avantages et inconvénients des méthodes

Les méthodes sont axées sur une compréhension et une meilleure maîtrise des différents éléments qui influencent le comportement d'une chaussée. Elles permettent d'isoler une variable et d'évaluer les effets d'une modification de cette variable sur la chaussée. En présence de conditions nettement différentes du passé, elles ont donc un avantage indéniable par rapport à des façons de faire basées sur l'expérience seule.

Comme autres avantages, la conception peut être adaptée aux conditions du site. Il est aussi maintenant possible de créer diverses options pour ensuite mettre en parallèle les coûts et le comportement anticipé, ce qui laisse beaucoup plus de latitude au concepteur. Enfin, ces approches constituent un soutien et un stimulant aux activités de recherche et développement. Elles facilitent l'éclosion de techniques innovatrices et l'intégration des nouveaux produits et des nouvelles technologies dans la pratique.

Par un dimensionnement adapté, les volumes de matériaux sont limités aux besoins du projet avec un impact non négligeable sur l'environnement. On évite la surexploitation des ressources. De plus, certains matériaux, autrefois déclassés et destinés aux rebuts, ainsi peuvent être reconsidérés dans le processus de conception. Les champs d'application des technologies de récupération, de traitement et de recyclage des matériaux de démolition ou des rebuts peuvent être ainsi beaucoup mieux cernés. Grâce à une meilleure compréhension des phénomènes en cause, le développement de ces technologies est accéléré et mieux dirigé.

Les avantages des méthodes sont reproduits au tableau 3. Tel qu'il est indiqué, on y retrouve aussi certains inconvénients.

TABLEAU 3 : AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES MÉTHODES DE CONCEPTION AVEC MODÉLISATION	
Avantages :	<ul style="list-style-type: none"> - démarche rationnelle et structurée ; - conception adaptée ; - extrapolation rendue possible ; - analyses d'options ; - analyses de sensibilité ; - soutien à la recherche et développement ; - accélération des processus d'intégration des nouveaux produits et de nouvelles technologies.
Inconvénients :	<ul style="list-style-type: none"> - plus grande précision requise dans les données ; - optimisation des méthodes à l'aide d'essais plus sophistiqués ; - méthodes souvent complexes ; - nécessité de valider les résultats.

Les modèles sont parfois très complexes et exigent une plus grande précision dans l'évaluation des éléments. Ils peuvent être utilisés sur la base de valeurs d'entrée corrélées à partir d'essais simples, mais leur utilisation optimale est fondée sur des propriétés et des mesures obtenues à partir d'équipements parfois coûteux. La validation des résultats doit compléter le processus afin d'éviter des écarts significatifs entre les performances attendues et réelles.

PERSPECTIVES ET CONCLUSION

La question aujourd'hui n'est plus de savoir si l'on doit adopter ou non de telles approches. Cette étape doit être franchie. En fait, un nombre croissant d'administrations routières se tournent vers leur emploi dans la pratique de façon à répondre aux besoins d'aujourd'hui et stimuler la recherche dans le domaine routier.

Les modèles sont souvent complexes, mais c'est le prix à payer pour introduire de nouvelles méthodologies plus souples et plus performantes. Bien sûr, ils ne fournissent pas réponse à tout avec une garantie à toute épreuve. Un jugement doit être porté par les spécialistes sur le processus d'application et sur les résultats.

Ils constituent, malgré tout, des outils puissants pour pouvoir évaluer, et nous devons en tirer profit au meilleur de nos connaissances. C'est par l'usage de ces méthodes que nous pourrions le mieux utiliser les résultats des projets de recherche en cours, comme celui du programme SHRP, et tous ceux dont nous soutenons ou encourageons la réalisation.

Ces approches ne constituent qu'un maillon de la chaîne et elles doivent s'insérer dans un processus global. Il ne sert à rien de concevoir de bonnes chaussées si la qualité de la fabrication et de la mise en oeuvre des matériaux ainsi que la qualité des interventions d'entretien ne correspondent pas aux attentes. Il est possible de simuler les effets d'une bonne mise en pratique sur la vie utile d'une chaussée, comme, par exemple, un uni de surface amélioré. Il est aussi possible de fournir une contribution très valable en vue de cibler les points majeurs qui ont un impact sur la qualité d'une chaussée et qu'il serait utile d'améliorer au chapitre des spécifications et de l'exécution.

Les méthodes élaborées en dimensionnement structural des chaussées ouvrent la voie à de nouvelles technologies. Elles présentent un potentiel certain pour obtenir des retombées positives sur l'environnement, sur les ressources financières requises et sur une meilleure qualité du réseau. Le matériel est disponible. Il ne nous reste qu'à l'utiliser au maximum de ses possibilités.

Références

1. American Association of State Highway and Transportation Officials, *AASHTO Guide for design of pavement structures*, Washington D.C. 1986.
2. Yoder E.J., Witezak, M.W. *Principles of pavement design*, 2nd edition, U.S.A., (1975), John Wiley and Sons Inc.
3. Tessier, G. Robert, *Guide de construction et d'entretien des chaussées*, (1990), Bibliothèque nationale du Québec, AQTR.
4. The Asphalt Institute, *Thickness design - asphalt pavements for highways and streets*, manual serie No 1 (MS-1), (1984), U.S. Library of Congress Catalog.
5. Ministère des Transports du Québec, *Cahier des normes-ouvrages routiers*, Tome 1, Bibliothèque nationale du Québec.



MINISTÈRE DES TRANSPORTS



QTR A 056 758