

COMMISSION ECONOMIQUE EUROPEENNE

COMMISSION

Direction Générale des Transports

7417/VII/67-F  
C/24-67

Bruxelles, le 17 mai 1967

CONFIDENTIEL

Comité d'experts gouvernementaux chargés d'assister  
la Commission dans les études de coût des transports

**RAPPORT DEFINITIF**

sur l'étude du problème des coûts marginaux  
d'usage des infrastructures servant aux transports par route  
établi sur demande de la Commission  
par un groupe d'experts

---

Rapporteur principal : M. QUINET, ingénieur des ponts et chaussées,  
Paris

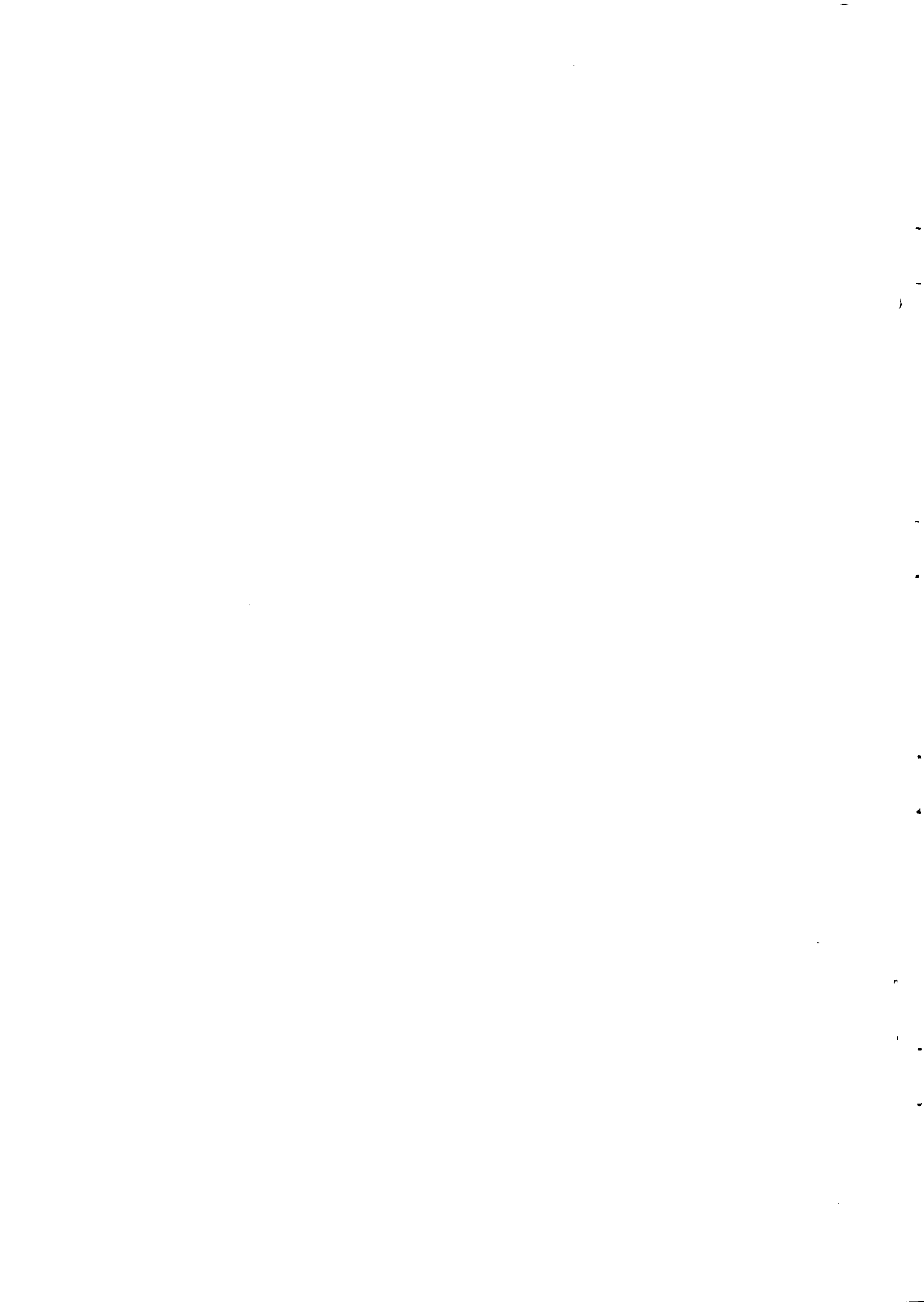
Co-rapporteurs : Prof. Ing. Dr. Corrado GUZZANTI, Ordinario di  
Tecnica ed Economia dei Trasporti, Pisa  
Dr. Robert ADAMEK, Regierungsdirektor, Bonn  
Ir. J.A.C.Th. BROUWERS, Rijkswegenbouwlaborato-  
rium, Delft  
M. Philippe LEGER, ingénieur des ponts et chaus-  
sées, Paris

Observatoire Economique  
Statistique des Transports

DOCUMENTATION

Vol. 8°

CDAT  
723 A



Dans le cadre de l'étude pilote sur l'axe de transport Paris - Le Havre, la Commission a chargé un groupe d'experts indépendants de déterminer les coûts marginaux d'infrastructure routière relatifs à cet axe<sup>(1)</sup>. Le présent rapport a pour objet d'exposer les résultats des travaux de ce groupe d'experts.

Ces travaux se sont appuyés sur les données chiffrées de l'axe Paris - Le Havre mais les méthodes utilisées visent à la généralité et pourraient, avec quelques aménagements particuliers, être employées pour le calcul des coûts marginaux de tout autre réseau routier.

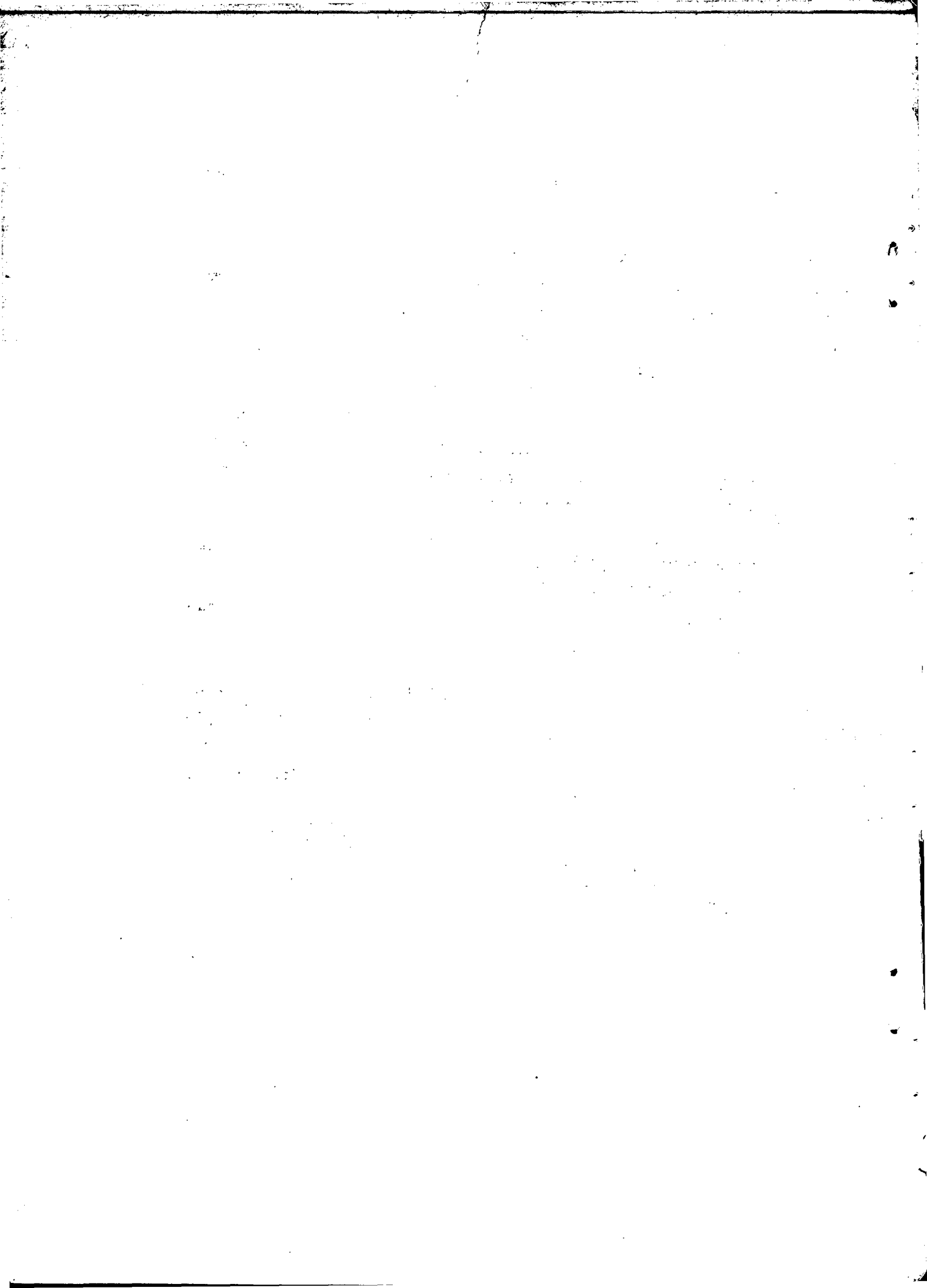
Le présent rapport a reçu l'approbation de tous les experts ayant participé au groupe, sauf de M. BROUWERS qui a émis un certain nombre de réserves qui l'ont conduit à établir un rapport personnel qu'on trouvera en annexe 2.

Les deux premières parties du rapport ont d'ailleurs ce caractère de généralité : la première est consacrée à la définition du coût marginal et à l'examen de quelques problèmes liés à cette notion, et la deuxième vise à dégager les principes généraux de calcul des coûts marginaux de la route.

Dans la troisième partie on appliquera les principes généraux ainsi mis en évidence au cas de l'infrastructure routière de l'axe de transport Paris - Le Havre.

---

(1) Le mandat complet du groupe figure en annexe 1.



Première Partie

LE COUT MARGINAL - DEFINITIONS ET CONSIDERATIONS THEORIQUES

Dans le cas, par exemple, d'une usine fabriquant un seul bien, le coût marginal est, on le sait, égal à l'augmentation de dépense qu'entraînerait la fabrication d'une unité supplémentaire du bien en cause. Si  $D(q)$  est la fonction qui relie la dépense à la quantité de bien produite, le coût marginal est :

$$D(q + 1) - D(q)$$

ou encore, en notations différentielles,

$$\frac{dD(q)}{dq}$$

A moins que la fonction  $D(q)$  soit linéaire, ce coût marginal varie avec le niveau de production de l'usine; en général, il commence par baisser, puis passe par un minimum et se relève ensuite.

Cette notion se généralise facilement au cas où l'unité de production considérée ne fournit pas un seul mais plusieurs biens 1, 2 ... n, en quantités  $q_1, q_2 \dots q_n$ . Il y a alors, pour un niveau de production donné de chacun des biens autant de coûts marginaux qu'il y a de biens. Le coût marginal du bien 1 sera par exemple  $D(q_1 + 1, q_2 \dots q_n) - D(q_1, q_2 \dots q_n)$  ou, en notations différentielles,

$$\frac{\partial D}{\partial q_1}(q_1, q_2 \dots q_n)$$

et de même pour les autres biens.

Ces définitions classiques sont directement applicables au cas des infrastructures routières;  $D$  représente alors la dépense d'entretien et de fonctionnement ou plus exactement une certaine catégorie de dépenses d'entretien et de fonctionnement et les divers services produits par la

.../...

route 1, 2 ... n, sont les catégories de trafic qui l'utilisent, chaque catégorie étant formée de  $q_i$  véhicules de mêmes caractéristiques.

Il se trouve d'ailleurs que dans le cas routier, pour la plupart des dépenses, on a mis en évidence l'existence de coefficients d'équivalence  $e_i$  entre véhicules, tels que par exemple les coefficients d'équivalence d'encombrement pour la largeur des chaussées, ou les coefficients d'équivalence vis-à-vis de la dégradation des chaussées pour leur épaisseur. La dépense  $D(q_1, q_2 \dots q_n)$  est de la forme :

$$D(q_1 e_1 + q_2 e_2 + \dots + q_n e_n)$$

en posant

$$q_1 e_1 + \dots + q_n e_n = W.$$

Les coûts marginaux auront comme valeur pour les types différents de véhicules :

$$\frac{dD}{dW} e_1, \frac{dD}{dW} e_2 \dots \dots \dots, \frac{dD}{dW} e_n$$

et ce seront les modalités de détermination de ces quantités qui feront l'objet des parties II et III de ce rapport.

Mais il n'est pas mauvais, auparavant, de mettre l'accent sur certains problèmes et certaines questions liés au calcul des coûts marginaux.

a) Tout d'abord, une perception éventuelle des coûts marginaux ne restituera que très rarement la dépense engagée. Ce serait un hasard extrême que l'on ait :

$$q_1 \frac{\partial D}{\partial q_1} + \dots + q_n \frac{\partial D}{\partial q_n} = D(q_1 \dots q_n).$$

.../...

Les coûts marginaux sont donc tout autre chose qu'une clé d'imputation de la dépense totale. On peut toutefois en déduire une telle clé d'imputation; certains économistes, en effet, proposent de prendre pour clé d'imputation des quantités proportionnelles aux coûts marginaux; mais d'autres préféreraient que l'écart entre la perception du coût marginal et la dépense totale soit réparti proportionnellement aux élasticités de la demande des différents biens en cause.

Cependant, toujours dans l'optique d'une répartition de la dépense, et pour le cas de l'Allemagne fédérale, M. ADAMEK a étudié les conséquences d'une répartition, proportionnellement au poids des véhicules, des dépenses d'entretien et de grosses réparations. Les résultats de ses travaux sont consignés en annexe 3.

b) En deuxième lieu, la valeur des coûts marginaux sera sous la dépendance étroite de la technique avec laquelle la route aura été construite. Il y a autant de coûts d'entretien que de structures de chaussées; M. GUZZANTI a développé des considérations théoriques sur les liens entre coût d'usage et coût de premier établissement et sur l'effet du progrès technique; ces considérations pourraient d'ailleurs trouver un champ d'application dans le problème de la détermination de la structure d'un réseau à créer, ou dans celui de l'adaptation d'un réseau existant à de nouvelles conditions de trafic. Pour le problème présent et compte tenu du peu de données statistiques dont on dispose, il en résulte essentiellement la nécessité de différencier le coût selon la structure de la chaussée. Les considérations de M. GUZZANTI sont consignées en annexe 4.

c) Enfin, rappelons que la détermination des coûts marginaux suppose que la gestion du réseau est optimale, c'est-à-dire que les opérations d'entretien et d'investissement sont, d'un point de vue économique, effectuées de la manière la plus profitable à la collectivité. Mais on ne peut pas soutenir qu'il n'en soit pas ainsi dans la réalité; la question de savoir si la gestion est optimale ou non doit s'apprécier non pas dans l'abstrait, mais compte tenu des contraintes politiques, financières et

autres qui délimitent le champ des possibilités réelles. En effet, d'une part, le montant des crédits routiers alloués par l'Etat correspond à un arbitrage entre les divers besoins d'équipement collectif de la nation, besoins routiers, besoins d'hôpitaux, d'écoles, besoins de défense nationale, etc.; et cet arbitrage, à caractère extra-économique, c'est-à-dire politique, correspond à un optimum à l'échelon de la nation. D'autre part, on ne peut nier que cette masse de crédits ainsi allouée ne soit utilisée au mieux par les ingénieurs, compte tenu des connaissances techniques et des possibilités et tolérances d'exécution du moment, et des besoins de la circulation routière.

.../...



Deuxième Partie

PRINCIPES GENERAUX DE DETERMINATION DES COUTS MARGINAUX DANS LE CAS DE LA ROUTE

Le calcul des coûts marginaux routiers se heurte à trois sortes de difficultés :

Tout d'abord le trafic routier n'est pas homogène, mais présente au contraire une grande hétérogénéité entre les véhicules légers et les différents types de poids lourds; il n'y aura pas un seul coût marginal, mais autant de coûts marginaux différents que de classes de véhicules.

Ensuite le réseau routier lui-même est hétérogène; les diverses routes qui le composent n'ont pas été construites selon les mêmes procédés techniques et n'engendrent pas les mêmes dépenses.

La troisième difficulté résulte du fait que les dépenses, elles-mêmes de différentes natures, ne sont connues que globalement. Leur affectation à telle ou telle catégorie de trafic ne peut résulter que d'une analyse détaillée poste par poste, jointe à une bonne connaissance de la liaison qui existe entre le niveau de chaque poste de dépense et le trafic qui l'occasionne; la manière dont cette liaison peut être déterminée devra être examinée soigneusement.

Examinons successivement ces trois points :

1° L'hétérogénéité du trafic

Sur les routes nationales, qui forment la quasi - totalité des tracés étudiés dans le cadre de l'étude pilote, la composition du trafic exprimé en véhicules-kilomètres est, en pourcentage de la circulation motorisée totale, la suivante :

.../...

- motos, scooters, voitures particulières et camionnettes de charge utile inférieure à 1 tonne .....	83 %
- camions légers, de charge utile comprise entre 1 et 3 tonnes .....	5 %
- camions de charge utile supérieure à 3 tonnes .....	10,5 %
- engins spéciaux, véhicules agricoles et véhicules pour transports en commun .....	1,5 %
total .....	<hr/> 100 %

Les divers types de véhicules qui viennent d'être cités n'ont pas la même responsabilité sur les dépenses. Il y a, à cet égard entre eux, des coefficients d'équivalence, qui sont d'ailleurs différents selon la nature de la dépense que l'on considère; les diverses valeurs de ces coefficients d'équivalence seront examinées ultérieurement à propos de chaque type de dépense.

Enfin, en France, la circulation croît actuellement au rythme de 10 % par an, sa composition restant assez stable. On prévoit que ce taux géométrique de croissance diminuera dans le temps : la croissance sera dans l'avenir à peu près linéaire et non pas exponentielle.

## 2° L'hétérogénéité des routes

Les routes ne sont pas construites selon un modèle unique; leurs structures sont très diverses. Pour s'en tenir aux différences les plus caractéristiques relatives à la constitution de la chaussée on doit distinguer :

- Les "chaussées de type traditionnel" constituées par une ou plusieurs couches de graves surmontées d'enduits superficiels ou d'enrobés de faible épaisseur.

.../...

- Les chaussées revêtues d'un type d'enrobés épais d'environ 6 cm et plus.
- Les chaussées constituées de graves stabilisées au ciment ou au laitier revêtues d'un tapis d'enrobés mince ou d'un enduit superficiel, qu'on appellera par la suite "chaussées semi-rigides".
- Les chaussées rigides en béton de ciment.

Comme on le verra, ces quatre types de chaussées ont des comportements très différents vis-à-vis des charges qui leur sont appliquées.

### 3° Les différents types de dépenses et leur liaison avec le trafic

L'exploitation, l'entretien et la conservation des infrastructures routières nécessitent des dépenses de différents ordres qui vont être maintenant passées en revue. Pour des motifs d'ordre technique et statistique, on distinguera :

#### a) Les dépenses de police de la circulation

Pour des raisons faciles à comprendre, il n'est en général pas possible d'affecter à chaque section de route, un montant de dépenses de police routière. Les seuls renseignements dont on dispose à leur égard sont à caractère global; en France ils ont trait aux dépenses de police sur l'ensemble du territoire français, sans discrimination géographique, si ce n'est une distinction entre dépenses dans les grandes agglomérations et dépenses hors grandes agglomérations. Ces renseignements sont fournis par les rapports biennaux de la Commission des comptes des transports de la nation.

On ne pourra donc à leur sujet faire qu'un calcul très global, qui consistera à rapprocher l'évolution dans le temps de ces dépenses à l'évolution dans le temps de l'ensemble de la circulation puis à ventiler entre les différents types de véhicules, la partie de ces dépenses qui,

au vu de cette confrontation, apparaîtra variable avec le trafic; cette ventilation pourra se faire proportionnellement aux coefficients d'encombrement des différents véhicules, puisque c'est essentiellement du degré d'encombrement des routes que dépend le montant des dépenses de police.

Nota : On sent intuitivement que la démarche qui est ici présentée pour le calcul des coûts marginaux est équivalente à celle qui a été proposée dans la première partie. En fait, elle s'y ramène rigoureusement. On peut le voir de la façon suivante dans le cas d'une dépendance linéaire (le raisonnement serait aussi valable pour une autre forme de dépendance):

Selon la présentation antérieure, la dépense est liée au trafic équivalent

$$W = e_1 q_1 + \dots + e_n q_n \text{ par une loi :}$$

$$D = a + b W$$

et le coût marginal de la première catégorie de véhicules est :

$$\frac{D}{q_1} = b e_1$$

si on exprime le trafic, non plus en véhicules équivalents-kilomètres, mais en véhicules-kilomètres  $T = q_1 + \dots + q_n$

$$D = a + b \times c \times T$$

$$\text{avec } c = \frac{e_1 q_1 + \dots + e_n q_n}{q_1 + \dots + q_n}$$

D'une route à l'autre, c'est constant car la structure du trafic est très stable; la méthode proposée ici revient à répartir la quantité  $b c$  entre les différents véhicules proportionnellement à leur poids dans le trafic équivalent total. On obtient alors pour la classe  $l =$

.../...

$$b \text{ c x } \frac{q_1 + \dots + q_n}{e_1 q_1 + \dots + e_n q_n} \times e_1$$

soit  $b \times e_1$ .

On retombe bien sur le coût marginal précédemment défini.

b) Les dépenses d'exploitation et d'entretien autres que l'entretien de la chaussée

Ces dépenses recouvrent les postes :

- Entretien des accessoires de chaussées
- Signalisation horizontale et verticale
- Eclairage
- Accotements et terre-pleins
- Service d'hiver
- Intempéries exceptionnelles

du questionnaire numéro 6 de l'étude pilote. Elles présentent entre elles les points communs suivants :

- d'une part leur niveau est peu dépendant de la structure de la chaussée : on ne distinguera donc pas pour elles entre les différents types de routes ;

- d'autre part leur importance est liée au volume du trafic, c'est-à-dire au degré d'encombrement de la voie. Ceci est évident pour les dépenses d'exploitation proprement dites : plus une chaussée est utilisée, plus le service d'hiver, la signalisation, l'éclairage sont soignés.

Mais il en est ainsi de même pour les autres dépenses d'entretien comme par exemple l'entretien des accotements et des accessoires de chaussées, le fauchage des haies, les déliègements, l'entretien des bordures de chaussées : on sera pour ces types de travaux plus exigeant pour une route à forte circulation que pour une route peu fréquentée.

.../...

Les renseignements fournis par les services locaux sur les différentes sections de route de l'étude pilote permettent une étude statistique de cette liaison. Cette étude statistique sera réalisée à partir de deux modèles différents.

Le premier, le plus simple, visera à relier les dépenses kilométriques annuelles au trafic kilométrique annuel de chacune des sections recensées par une relation de la forme

$$D = a + b T$$

a est l'élément constant des coûts indépendants du trafic ;

b sera alors le coût marginal par véhicule-kilomètre cherché.

On pourra nuancer ce coût marginal par l'adoption de coefficients d'équivalence entre véhicules ; compte tenu de ce qui précède, les plus vraisemblables sont les coefficients d'équivalence d'encombrement.

Le deuxième, plus complexe, vise à une détermination partielle de ces coefficients d'équivalence à partir des informations statistiques, au moyen d'une relation du type :

$$D = a + b T_{vl} + c T_{pl}$$

$T_{vl}$  représente le trafic de voitures particulières et de véhicules utilitaires de charge utile inférieure à 3 T ;

$T_{pl}$  représente le trafic de véhicules utilitaires de charge utile supérieure à 3 T.

Dans ces conditions, b représente le coût marginal moyen de l'ensemble des véhicules de charge utile inférieure à 3 T, et c le coût marginal moyen de l'ensemble des véhicules de charge utile supérieure à 3 T,  $\frac{c}{b}$  étant le coefficient d'équivalence moyen entre ces deux catégories.

Il est toutefois très possible que cette deuxième méthode ne fournisse pas de résultats nets, car, d'une part,  $T_{vl}$  et  $T_{pl}$  ne sont connus qu'avec une faible précision et, d'autre part, il existe une forte corrélation entre ces deux variables d'une section de route à l'autre. Ces

raisons expliquent d'ailleurs qu'il n'ait pas été jugé utile de raffiner davantage l'analyse en séparant le trafic selon des catégories plus différenciées.

c) Dépenses d'entretien courant des chaussées

Elles intéressent essentiellement la résistance mécanique des chaussées aux charges qui leur sont appliquées et, de ce fait, méritent d'être bien distinguées des précédentes.

Ces dépenses sont relatives aux réfections d'enduits superficiels et aux opérations de point à temps et d'emplois partiels pour les chaussées souples, à l'entretien des dalles pour les chaussées rigides.

Il convient alors de répartir la part variable de ces dépenses en fonction de coefficients d'équivalence exprimant la responsabilité des divers véhicules dans la destruction des chaussées. Or, ces coefficients d'équivalence diffèrent selon la structure de la chaussée. Examinons de ce point de vue les quatre types de structure envisagés.

- Chaussées de type traditionnel

Ces chaussées forment une grande partie des réseaux européens; certaines d'entre elles subissent un trafic intense auquel elles ne sont pas adaptées; leur comportement dépend d'une manière mal connue de nombreux paramètres (sols, climat, drainage, qualité de la couche de base, etc.). Leurs structures, leurs matériaux constitutifs, leur entretien varient d'une région à l'autre.

Dans l'essai AASHO, il n'y a eu d'enduits superficiels que sur les circuits 1 et 2, qui n'ont pas subi le passage d'essieux de plus de 2,7 tonnes; ce type de structure présente donc une résistance aux charges particulièrement mal connue.

.../...

Cette résistance aux charges en outre est très variable d'une route à l'autre selon les conditions locales climatiques, le sol de fondation, le drainage, la constitution des couches de base, la qualité du revêtement et la composition du trafic. En un sens, chaque route de ce type a sa loi de comportement propre, d'ailleurs inconnue.

L'analyse théorique ne permet pas, dans son état actuel, de suppléer à cette ignorance.

Notre connaissance purement scientifique de ce type de chaussée est donc très limitée; elle exclut toute solution rigoureuse pour la détermination des coûts d'entretien, et on ne peut proposer que des méthodes empiriques et fondées sur l'expérience et la pratique des ingénieurs, et valables en moyenne et non pour telle ou telle chaussée déterminée.

Le processus de calcul proposé est le suivant :

- par une analyse statistique des renseignements relatifs à cette catégorie de chaussée, on s'efforcera de mettre en évidence une relation du type :

$$D' = a + b T_{vl} + c T_{pl}$$

où  $T_{vl}$  et  $T_{pl}$  ont la même signification que précédemment; les coefficients  $b$  et  $c$  ainsi obtenus ont le caractère de coûts marginaux moyens pour la catégorie de véhicules à laquelle ils correspondent. On différenciera les coûts marginaux ainsi obtenus selon le type de véhicules, au moyen de coefficients d'équivalence de la forme  $P^e$ ,  $e$  étant un exposant qu'il n'est pas possible de déterminer scientifiquement de manière rigoureuse, mais qu'un solide faisceau de raisons, issues essentiellement de l'extrapolation des essais AASHO et de l'expérience courante des ingénieurs et techniciens, conduit à choisir égal à quatre.

.../...



- Chaussées revêtues d'un tapis épais d'enrobés

C'est une des catégories de chaussées qui a été étudiée lors des essais AASHO. Si l'application des résultats de ces essais est par ailleurs souvent critiquable, il apparaît cependant que certaines lois qu'ils ont permis de dégager peuvent être, sans grande difficulté, utilisées pour le calcul des coûts marginaux.

En particulier la loi issue de ces essais qui relie la valeur des déflexions de printemps à la durée de vie de la chaussée, peut être retrouvée par des considérations théoriques, d'une part, et des résultats de laboratoire sur la durée de vie en fatigue des matériaux enrobés, d'autre part; les hypothèses les plus nécessaires pour expliquer cette loi sont :

- a) que la chaussée péricite par fissuration de la couche hydrocarbonée ;
- b) que la couche de fondation est formée de matériaux granulaires de qualité convenable.

Pour une étude portant sur un réseau assez long, cette hypothèse peut être admise statistiquement.

Cette loi a montré en particulier que la dégradation de la chaussée est provoquée par le passage répété des essieux des véhicules, chaque essieu ayant dans cette dégradation une part proportionnelle à  $P^e$ ,  $P$  étant le poids de l'essieu,  $e$  étant un exposant dont la valeur est de l'ordre de 4.

Ceci suggère le processus d'étude suivant : on déterminera de façon statistique les paramètres  $a$  et  $b$  de la relation

$$D = a + b T$$

$D$  représentant la dépense en cause et  $T$  le trafic total.

$b$  sera le coût marginal du véhicule moyen, et l'on différenciera ce coût marginal proportionnellement aux termes  $P^4$ ,  $P$  étant le poids des essieux du véhicule.

- Chaussées semi-rigides

En ce qui concerne les structures de ce type, les essais AASHO n'apportent que relativement peu de renseignements. Seules quelques sections satellites de l'essai comportaient des couches de base en grave-ciment de qualité assez moyenne, sur une épaisseur relativement faible de couche de fondation. Ces structures présentaient pour la plupart des déflexions de printemps excessives au regard des normes américaines et de l'expérience européenne.

Les chaussées ici analysées ne paraissent pas avoir fait l'objet d'études systématiques (les techniques de traitement des assises n'étant pas encore suffisamment unifiées).

En se fondant sur l'expérience acquise, il paraît que l'entretien des chaussées est relativement faible (pose d'un revêtement superficiel à des dates relativement espacées et ce, essentiellement, en fonction de l'usure de surface et de l'augmentation de la glissance, phénomène dont l'évolution en fonction du trafic est très mal connue).

Compte tenu de l'absence de loi analytique clairement dégagée, il convient donc, pour obtenir un coût marginal d'entretien, de procéder comme il est indiqué au paragraphe "chaussées de type traditionnel", en notant toutefois que dans le présent cas, la nature du sol de fondation aura sans doute beaucoup moins d'influence sur les résultats.

D'après ce qui a été dit précédemment, et en l'absence de connaissances plus exactes sur la résistance à la fatigue des matériaux traités aux liants hydrauliques (les contraintes ou déformations admissibles semblent cependant varier beaucoup moins vite en fonction de la durée de vie que pour les enrobés aux liants hydrocarbonés), il paraît impossible pour l'instant de calculer des coefficients d'équivalence "d'usure" entre essieux.

.../...

On pourrait alors essayer divers types de coefficients d'équivalence entre essieux de la forme  $P^e$  mais il est à noter ici que la valeur la plus vraisemblable de  $e$  sera sans doute nettement supérieure à 4.

- Chaussées en béton

La moitié des circuits de l'essai AASHO ont été construits en béton de ciment. L'essai a permis de mettre en lumière un certain nombre de résultats et d'établir une relation empirique entre l'épaisseur de la dalle et la durée de vie.

Malheureusement, il n'a pas été utilisé de couche de fondation traitée aux liants hydrauliques ou hydrocarbonés, type de couche de fondation de plus en plus utilisé actuellement.

Compte tenu de ce fait et de l'importance du pumping dans les phénomènes de détérioration, il apparaît difficile d'appliquer sans discernement les résultats de l'essai AASHO en vue, par exemple, d'une méthode analogue à celle qui a été exposée dans le paragraphe "chaussées revêtues d'un tapis épais d'enrobés". Il faut noter, d'autre part, que la plupart des chaussées en béton se trouvent dans la zone d'extrapolation de l'essai AASHO et que la forme mathématique de la loi trouvée reliant épaisseur et durée de vie qui est ajustée sur des points extrêmement groupés est peut-être extrêmement sujette à caution.

Compte tenu des études existantes sur le comportement à la fatigue des bétons de ciment, et en l'absence de pumping (couche de fondation en grave-ciment), il paraît donc que, comme dans le cas des chaussées à couche de base traitée aux liants hydrauliques, les chaussées en béton de ciment ne se dégradent que très lentement; dans une première phase (signalons cependant que la dégradation intervient ensuite très rapidement), l'entretien des chaussées se réduit alors à des traitements de surface (entretien des joints).

.../...

Il semble donc que dans le cas de chaussées en béton, le coût marginal doive encore être déterminé empiriquement comme dans le paragraphe "chaussées de type traditionnel".

Dans ce cas encore, il ne semble pas qu'il existe, à chaussée donnée, une pondération convenable entre les différentes catégories d'essieux.

Une méthode possible serait là encore d'essayer une batterie de coefficients d'équivalence de la forme  $P^e$ ,  $e$  étant un exposant auquel on affecterait différentes valeurs, dont la plus vraisemblable sera sans doute nettement supérieure à 4.

d) Dépenses de renouvellement périodique

Les chaussées ont des durées de vie limitées; à l'inverse des ouvrages d'art, c'est par fatigue qu'elles se dégradent et périssent et dès qu'une chaussée a subi un certain trafic cumulé total, il devient nécessaire de la renouveler. Ce renouvellement destiné à lui redonner les caractéristiques originelles s'effectue à des intervalles de temps espacés de l'ordre de 10 à 20 ans, et selon des techniques dont les plus répandues en France sont les deux suivantes :

- renouvellement en enrobés. On applique sur la chaussée un tapis d'enrobés d'épaisseur convenable, mais de toute façon au moins égale à 6 cm environ ;

- renouvellement en graves-laitiers ou graves-ciments dans lesquels une couche de graves-laitiers ou graves-ciments d'une épaisseur minimum de 10 cm est ensuite surmontée d'un enduit superficiel ou d'un tapis mince d'enrobés.

La méthode qui est actuellement de loin la plus répandue est la première, d'un emploi plus souple et d'un coût moindre sur les routes dont le trafic reste faible ou dont la dégradation n'est pas trop prononcée. C'est pourquoi c'est essentiellement sur elle que seront faits les

calculs. Ceci ne préjuge d'ailleurs pas l'intérêt que présentent les renouvellements en graves-laitiers et graves-ciments; cet intérêt est incontestable et leur technique, assez récente, est certainement promise à un bel avenir, mais leur nouveauté même fait que l'on connaît encore très mal les lois auxquelles leur comportement obéit, alors que ces lois sont mieux connues dans le cas d'enrobés.

L'essai AASHO a en effet mis en évidence la relation suivante entre la durée de vie d'une chaussée souple et sa déflexion de printemps :

$$\log W_{2,5} = 11,20 + 1,32 \log L_1 - 3,25 \log d_1$$

où  $W_{2,5}$  est la durée de vie de la chaussée pour un indice de viabilité de 2,5 (durée de vie exprimée en nombre d'essieux équivalents),

$L_1$  la charge de l'essieu en tonne,

$d_1$  la déflexion mesurée sous une roue de charge  $L/2$  et exprimée en centièmes de millimètre.

Comme d'autre part il existe une relation moyenne entre l'épaisseur  $e$  d'un renforcement en enrobés et la réduction de déflexion qu'il entraîne

$$e = 50 \log \frac{d_c}{d_1}$$

on peut, connaissant la déflexion d'une chaussée et le trafic qu'elle supportera dans l'avenir, calculer l'épaisseur d'enrobés à y appliquer pour une durée de vie donnée.

L'utilisation des relations précédentes, jointe à l'expérience des ingénieurs, a conduit à édicter des règles sur le renouvellement des chaussées souples en France; ces règles sont résumées dans le tableau et le texte suivants :

.../...

EPAISSEUR D'ENROBES EN CM

Volume de la circulation en M J A d <sub>0</sub> en $\frac{10}{100}$ de mm:	6 000	3 000-6 000	3 000-1 500	1 500
100 - 125	10			
125 - 150	10	8		
150 - 200	15	10	8	
200 - 250	Etude spéciale nécessaire	15	10	8
250 - 300	Etude spéciale nécessaire	Etude spéciale nécessaire	15	10
300 - 325	Etude spéciale nécessaire	Etude spéciale nécessaire	Etude spéciale nécessaire	15
325 - 350	Etude spéciale nécessaire	Etude spéciale nécessaire	Etude spéciale nécessaire	15

Nota : Dans le cas où les ingénieurs estiment que la composition de la circulation est différente de la composition courante, soit qu'elle comporte davantage de poids lourds, soit qu'elle en comporte moins, il conviendra de changer de classe de circulation en passant dans la classe **immédiatement** supérieure dans le premier cas et dans la classe **immédiatement** inférieure dans le deuxième cas.

.../...

Cette politique assure une durée de vie de 10 ans, dans le cas d'un trafic croissant linéairement de 0,10 par an<sup>(1)</sup>. Elle constitue, en l'état actuel de nos connaissances, la solution optimale au problème des renouvellements en enrobés pour le cas français.

Il est possible, à partir de là, d'en déduire un coût marginal de renouvellement. Considérons par exemple le cas d'une route devant être renforcée à la date t d'une épaisseur e. Une faible variation (fictive) d<sub>q</sub> du trafic actuel (compté en essieux équivalents) entraîne la nécessité d'avancer la date de renforcement de

$$d t = \frac{d_q}{q(t)}$$

et ce renouvellement, au lieu d'avoir à supporter le trafic Q pour lequel il était prévu initialement (si le trafic croît linéairement de 0,10 par an)

$$Q = 10 \times 1,5 q(t) = 15 q(t)$$

devra pouvoir supporter le trafic :

$$Q + dq$$

au bout du même laps de temps. Son épaisseur, qui est déterminée par les relations

$$\log W = 12,67 - 3,25 \log d_0$$

$$o = 50 \log \frac{d_0}{d_1}$$

augmentera de la quantité

$$de = 6,7 \frac{d_q}{Q}$$

(1) On notera à cet égard que, puisque ces règles tiennent compte d'un trafic croissant dans le temps, elles ne conduisent pas exactement à un renouvellement à l'identique mais aussi, dans une certaine mesure, à un renforcement qui améliore la force portante de la chaussée. Les opérations qui vont être envisagées débordent donc légèrement le cadre qui avait été initialement fixé au groupe de travail et comportent une part d'investissement. Mais cette part d'investissement, qui est d'ailleurs très difficile à déterminer, entraîne un coût marginal, et il est apparu au groupe d'experts que ce coût marginal, qu'il était bien placé pour calculer, devait être pris en compte au même titre que les autres dépenses de maintien puisqu'ils correspondent à des frais réels à engager.

La combinaison de ces deux effets - avancement de la date du renforcement et augmentation de l'épaisseur de ce renforcement - entraîne une variation de dépense actualisée  $dD$  facile à calculer, et le coût marginal cherché est

$$\frac{dD}{d_q} .$$

Si maintenant la modification de trafic  $dq$  a lieu après le renforcement, on pourra s'y adapter<sup>(1)</sup> en augmentant l'épaisseur du renforcement de la quantité

$$de = 6,7 \frac{d_q}{Q} .$$

Il n'apparaît plus alors qu'une augmentation de l'épaisseur qui seule influera sur la dépense actualisée; celle-ci, rapportée à la variation de trafic qui en est la cause, définit le coût marginal, différent du précédent puisqu'on ne s'est pas placé au même instant de la vie de la chaussée.

L'application de cette méthode de calcul nécessite la connaissance des dates auxquelles les différentes sections de routes retenues devront être renforcées ainsi que de leur déflexion à cette date. Or, en France, il est assez facile, à partir des campagnes de mesures de déflexion récentes de définir les routes qui doivent dans un avenir très proche être renforcées, et de calculer l'importance de la dépense qui leur sera consacrée.

Mais il est beaucoup plus difficile de prévoir le moment à partir duquel telle route actuellement en bon état devra être renforcée et il l'est encore plus de définir l'importance de ce renforcement. C'est pourquoi le calcul ne peut avoir qu'un caractère assez global.

---

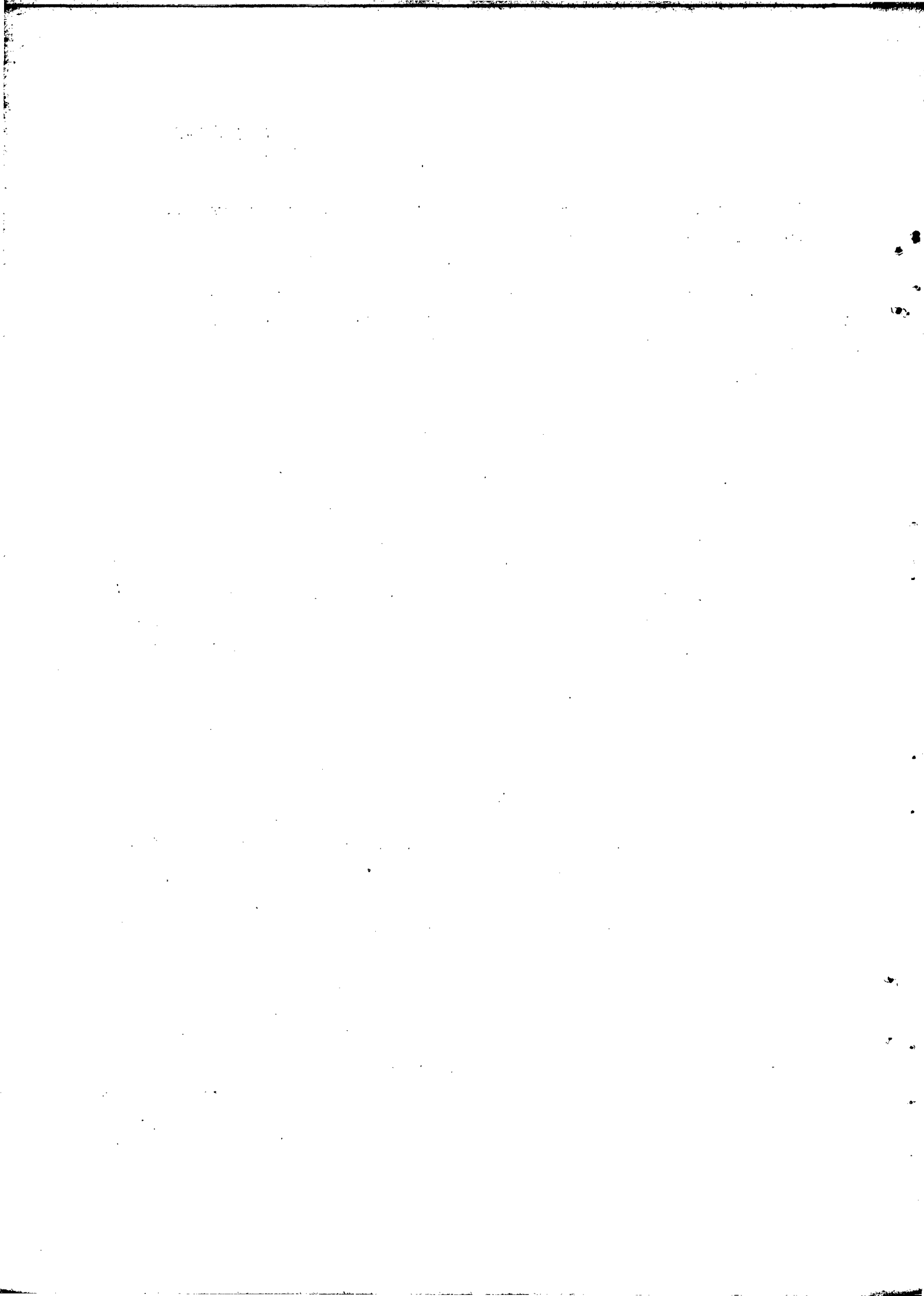
(1) Nous faisons ici usage, comme d'ailleurs précédemment, du résultat classique selon lequel à l'optimum l'utilisation des différents facteurs de production est également bonne et indifférente pour le niveau de la dépense.



Les coûts marginaux obtenus seront valables en moyenne et non sur telle ou telle section de route particulière.

Les coûts seront des coûts par essieu ; il sera alors facile d'en déduire le coût marginal d'un véhicule, en combinant les coûts des essieux que ce véhicule comporte.

.../...



Troisième Partie

CALCUL DES COÛTS MARGINAUX D'USAGE DE L'INFRASTRUCTURE ROUTIÈRE

PARIS - LE HAVRE

On examinera successivement les quatre types de dépenses qui viennent d'être recensés.

1° Dépenses de police de circulation routière

Comme on l'a vu il n'est guère possible d'envisager, pour ce poste, autre chose qu'une étude globale à l'échelle de l'ensemble de la France. Tout au plus peut-on distinguer, parmi l'ensemble des dépenses de police, celles qui sont effectuées à l'intérieur des grandes agglomérations et celles qui sont effectuées hors des grandes agglomérations. On se cantonnera à ces dernières, qui correspondent à peu près aux réseaux départementaux et nationaux et représentent mieux le type de routes retenues dans l'étude pilote.

Le taux de croissance de ces dépenses hors grandes agglomérations est d'environ 9 % par an en francs courants, soit en tenant compte d'une hausse moyenne de prix de 3 % par an, de 6 % en francs constants. Or, au cours de la période considérée, la circulation motorisée a crû d'environ 10 % par an. On en déduit que le coût marginal de police est égal aux  $\frac{6}{10}$  du coût moyen.

Quant au niveau de ces dépenses, il était en 1965 d'environ 530 millions de francs.

On obtiendra donc le coût marginal en multipliant par 0,6 le coût moyen, qui sera lui-même calculé en divisant la dépense de 530 millions par le trafic total de l'année.

.../...

Ce trafic sera exprimé non en véhicules-kilomètres, mais en unités d'encombrement. Le tableau suivant fournit le nombre d'unités d'encombrement contenues dans 1 000 véhicules pris au hasard sur les routes :

Type de véhicule	Nombre	J e u	
		Coefficient d'équivalence	Nombre d'unités d'encombrement
Voiture particulière	830	1	830
Camion de 1 t < CU < 3 t	50	2	100
Camion de 3 t < CU < 9 t	52	4	208
Camion de 9 t < CU	68	7	476
	<u>1.000</u>		<u>1.614</u>

Enfin, en 1965, le trafic total exprimé en véhicules-kilomètres était :

- sur les routes nationales :  
d'environ  $58 \times 10^9$  véhicules-kilomètres ;
- sur les routes départementales :

En l'absence de renseignements exhaustifs, on peut, au vu des comptages partiels disponibles, l'estimer à environ la moitié du trafic sur les routes nationales, soit

$30 \times 10^9$  véhicules-kilomètres.

La circulation totale, en véhicules-kilomètres, sur routes nationales et départementales serait ainsi de l'ordre de

$90 \times 10^9$  véhicules-kilomètres.

Ce chiffre est frappé d'une certaine incertitude mais semble raisonnable, si on le compare notamment au volume global de la circulation sur la totalité des routes françaises qui se montait en 1965 à environ  $130 \times 10^9$  véhicules-kilomètres.

.../...

Sur ces bases, les coûts marginaux dus aux dépenses de police s'établissent aux valeurs calculées dans le tableau ci-après :

	Jeu de coefficients d'équivalence
Nombre d'unités d'encombrement .....	$90 \times 10^9 \times \frac{1614}{1000} = 145 \times 10^9$
Coût marginal de l'unité d'encombrement .....	$\frac{6}{10} \times \frac{530 \times 10^6}{145 \times 10^9} = 0,023 \text{ F}$
Coût marginal kilométrique des différents types de véhicules	
Voitures particulières	$0,023 \times 1 = 0,0023 \text{ F}$
Camions de CU comprise entre 1 et 3 T .....	$0,023 \times 2 = 0,0046 \text{ F}$
Camions de CU comprise entre 3 et 9 T .....	$0,023 \times 4 = 0,0092 \text{ F}$
Camions de CU supérieure à 9 T .....	$0,023 \times 7 = 0,0160 \text{ F}$

2° Les dépenses d'exploitation et d'entretien autres que d'entretien courant de la chaussée

Il s'agit, rappelons-le, des postes de dépenses qui ont été recensés sous les rubriques :

- Entretien des accessoires de chaussées
- Signalisation horizontale et verticale
- Eclairage
- Accotements et terre-pleins
- Service d'hiver
- Intempéries exceptionnelles.

.../...

Ces dépenses sont fournies pour les 6 années 1960 à 1965 pour chacune des sections de route prises en compte. Mais alors que le département de l'Eure a inclus dans ses dépenses le montant des frais de personnel payés sur les chapitres budgétaires d'entretien, et directement affectés à l'exécution des travaux d'entretien, il n'en a pas été de même pour les départements de Seine-et-Oise et de Seine-Maritime qui ne disposent pas de comptabilité analytique susceptible de leur fournir les renseignements nécessaires à cet objet. Il a donc été effectué deux analyses séparées, l'une pour le département de l'Eure, l'autre pour les départements de Seine-et-Oise et Seine-Maritime. Pour chacun de ces deux groupes on a relié les dépenses annuelles au kilomètre D de chaque section de route, d'abord au trafic annuel total T de la section selon la relation

$$D = a + b T$$

puis ensuite, au trafic léger T V L et au trafic lourd T P L de la même section, selon la relation

$$D = a + b T V L + c T P L.$$

Les corrélations correspondantes ont pu être calculées sur 16 sections dans le groupe Seine-Maritime/Seine-et-Oise, et sur 17 sections pour l'Eure. Les résultats sont consignés dans le tableau suivant :

	Seine-Maritime et Seine-et-Oise	Eure
	Coefficient de corrélation	
Corrélation D = a + b T	0,90	0,89
Corrélation D = a + b TVL + c TPL	0,92	0,90

.../...

Ce tableau montre que la corrélation avec les deux variables TVL et TPL n'est pas sensiblement supérieure à la corrélation simple avec la seule variable T; cette impression pourrait être précisée par le test de Fisher qui montrerait que l'amélioration de corrélation que le premier modèle comporte par rapport au second n'est pas significative; en outre, dans ce deuxième modèle, les calculs ont montré que les coefficients a et b sont déterminés avec une très faible précision, ce dernier fait tirant son origine de l'étroite corrélation qui existe entre TVL et TPL. C'est pourquoi on s'est finalement arrêté à l'expression simple

$$D = a + b T.$$

Le coefficient b a les valeurs suivantes :

Seine-Maritime	0,00056 F/V.km
Seine-et-Oise	
Eure	0,00070 F/V.km.

L'écart entre les deux chiffres est dû au fait, déjà signalé, qu'on a inclus pour l'Eure dans les dépenses recensées les frais de personnel directs, alors que la Seine-Maritime et la Seine-et-Oise n'ont pas eu la possibilité de recenser ceux-ci. Il est d'ailleurs intéressant de remarquer que le rapport entre ces deux chiffres :

$$\frac{0,00056}{0,00070} = 0,80$$

est très voisin du rapport évalué, à l'échelon national, entre l'ensemble des crédits d'entretien non compris les frais de personnel directs qui se montaient en 1965 à 270.000.000 F, et l'ensemble des crédits d'entretien y compris les frais de personnel directs qui se montaient pour la même année à 340.000.000 F :

$$\frac{270.000.000}{340.000.000} = 0,79.$$

Tout ceci fait apparaître une certaine cohérence entre les résultats trouvés et conduit à préférer l'estimation issue des réponses de l'Eure, qui reflète mieux la réalité.

.../...

Le coût marginal ainsi obtenu de 0,0007 F correspond au cas où tous les véhicules ont le même poids dans la circulation.

Le coût marginal des différents véhicules qui s'obtient en différenciant la valeur précédente selon le nombre d'unités d'encombrement de chaque véhicule est donné par le tableau suivant :

Jeu de coefficients d'équivalence	
Nombre d'unités d'encombrement contenu dans 100 véhicules .....	161
Coût marginal de 100 V/K	0,07
<u>Coût marginal au kilomètre en francs</u>	
- Voitures particulière	0,00044
- Camions de CU comprise entre 1 et 3 T .....	0,0009
- Camions de CU comprise entre 3 et 9 T .....	0,0017
- Camions de CU supérieure à 9 T.....	0,003

3° Les dépenses d'entretien courant des chaussées

Il serait nécessaire, pour ce type de dépenses, de distinguer entre les différentes natures de chaussées; mais il se trouve que chacune des sections de route recensées dans l'enquête faite à propos de l'étude pilote est composée de sous-sections de structure différente; seules quelques sections sont suffisamment homogènes, et les dépenses d'entretien effectuées sur ces dernières ne sont pas sensiblement différentes de celles effectuées sur les autres; de manière plus précise, si sur un graphique dont l'abscisse est le trafic journalier moyen et

.../...



l'ordonnée la dépense kilométrique d'entretien de chaussée, l'on porte les différents points représentatifs des sections référées, on observe un nuage de points à peu près linéaire, et les points représentatifs de sections homogènes d'une structure donnée ne s'écartent pas du nuage moyen.

On est donc conduit à mélanger les différentes structures de chaussées pour rechercher la liaison entre dépense et trafic.

Les ajustements  $D = a + b T$  et  $D = a + b T V L + c T P L$  conduisent aux coefficients de corrélation suivants :

	Seine-Maritime et Seine-et-Oise	Eure
Corrélation		
$D = a + b T$	0,85	0,94
Corrélation		
$D = a + b T V L + c T P L$	0,87	0,95

L'impression qui se dégage de ce tableau, et qu'une analyse statistique plus rigoureuse confirme, est qu'il n'est pas possible, par l'analyse statistique seule, de séparer l'effet des poids lourds de celui des véhicules légers. On se cantonnera donc à la première loi

$$D = a + b T$$

en donnant, comme précédemment, la préférence aux résultats issus des réponses du département de l'Eure. Le coefficient b a pour valeur

$$0,00032 \text{ F/v.km.}$$

Il s'agit là d'un coefficient applicable au véhicule moyen; il convient de le différencier selon l'équivalence des différents véhicules vis-à-vis de la résistance de la chaussée. Les calculs développés en annexe 5 permettent de déterminer le coût de l'essieu équivalent de 13 T.

.../...

Nombre d'essieux équivalents de 13 T compris dans 1.000 véhicules	54
Coût marginal de l'essieu de 13 T	0,0060

On en déduit le coût marginal correspondant d'un véhicule donné en combinant les résultats de ce tableau avec ceux du tableau de l'annexe 5, qui donne pour chaque catégorie de véhicules le nombre d'essieux équivalents de 13 T qu'il comporte.

4° Les dépenses de renouvellement périodique

Ces dépenses engendrent un coût marginal dont le calcul exposé dans ses principes au cours de la deuxième partie, est détaillé dans l'annexe 6, qui fournit le tableau du coût marginal de l'essieu de 13 T selon l'année. Pour en déduire le coût marginal d'un véhicule quelconque, il faut multiplier le chiffre convenable de ce tableau par le nombre d'essieux équivalents de 13 T que contient ce véhicule.

.../...

Quatrième Partie

RECAPITULATION

Il serait fastidieux de récapituler, pour toutes les années et tous les véhicules, le coût marginal total qu'on obtient par l'addition des quatre coûts marginaux différents qui ont été examinés au cours de la troisième partie.

Nous nous contenterons de le faire pour l'année 1971, au sujet du véhicule léger, du camion de 19 T à 2 essieux et du camion remorque de 35 T à 4 essieux.

Véhicule léger	
Coût marginal de police	0,0023
Coût marginal d'exploitation et d'entretien courant	0,00044
Coût marginal d'entretien de la chaussée	0
Coût marginal de renouvellement	0
Coût marginal total au km	0,0027

Camion à 2 essieux de poids total en charge 19 T de silhouette 1	
Coût marginal de police	0,0160
Coût marginal d'entretien courant et d'exploitation	0,0030
Coût marginal d'entretien de la chaussée	0,0063
Coût marginal de renouvellement	0,102
Coût marginal total au km	0,127

.../...

Camion + remorque à 4 essieux de 35 T, silhouette 1	
Coût marginal de police	0,0160
Coût marginal d'entretien courant et d'exploitation	0,0030
Coût marginal d'entretien de la chaussée	0,0079
Coût marginal de renouvellement	0,128
Coût marginal total	0,155

Remarquons d'ailleurs que ces coûts sont assez peu sensibles à l'exposant de la loi d'équivalence entre essieux adoptée.

Les coûts marginaux de chacun des véhicules précédents prennent en effet les valeurs suivantes selon cet exposant :

Puissance de la loi d'équivalence entre essieux	1	2	3	4	5	6	7
Véhicule léger	0,0053	0,0029	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027
Camion de 19 T	0,060	0,089	0,109	0,127	0,146	0,159	0,175
Camion avec remorque de 35 T	0,096	0,127	0,138	0,155	0,160	0,172	0,190

Ceci permet de faire une comparaison entre les coûts marginaux qui ont été calculés dans le présent rapport avec l'exposant 4 pour la loi d'équivalence entre essieux, et les coûts totaux qui résulteraient de l'application à la dépense totale de clés de répartition selon une puissance comprise entre 1 et 2; ces clés sont celles proposées par M. BROUWERS et M. ADAMEK dans les annexes 2 et 3.

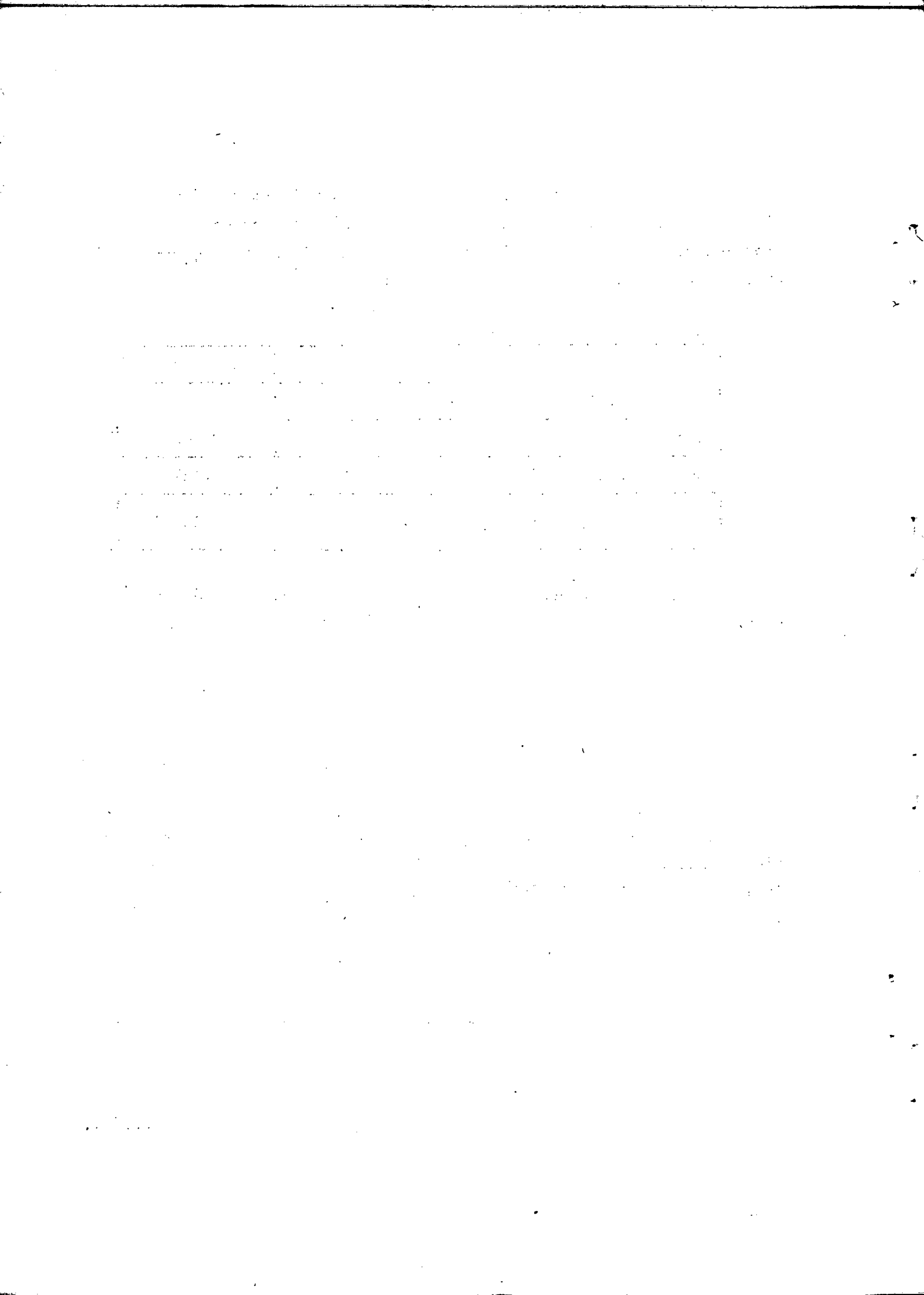
.../...

Les coûts marginaux laissent dans le cas présent un déficit de l'ordre de 30 % de la dépense totale; les coûts totaux correspondants s'obtiendront donc en multipliant les coûts marginaux par  $\frac{1}{1-0,3} = 1,5$ ; on est ainsi conduit au tableau suivant :

Type de véhicule	Coût total		Coût marginal
	exposant 1	exposant 2	
Véhicule léger	0,008	0,0045	0,0027
Camion de 19 T	0,090	0,130	0,127
Camion avec remorque de 35 T	0,150	0,190	0,155

On voit que ces coûts totaux sont très voisins des coûts marginaux.

Les résultats numériques auxquels on a abouti doivent être considérés comme uniquement valables pour l'axe Paris - Le Havre. Dans d'autres cas on pourrait évidemment obtenir des valeurs numériques différentes.



MANDAT DU GROUPE

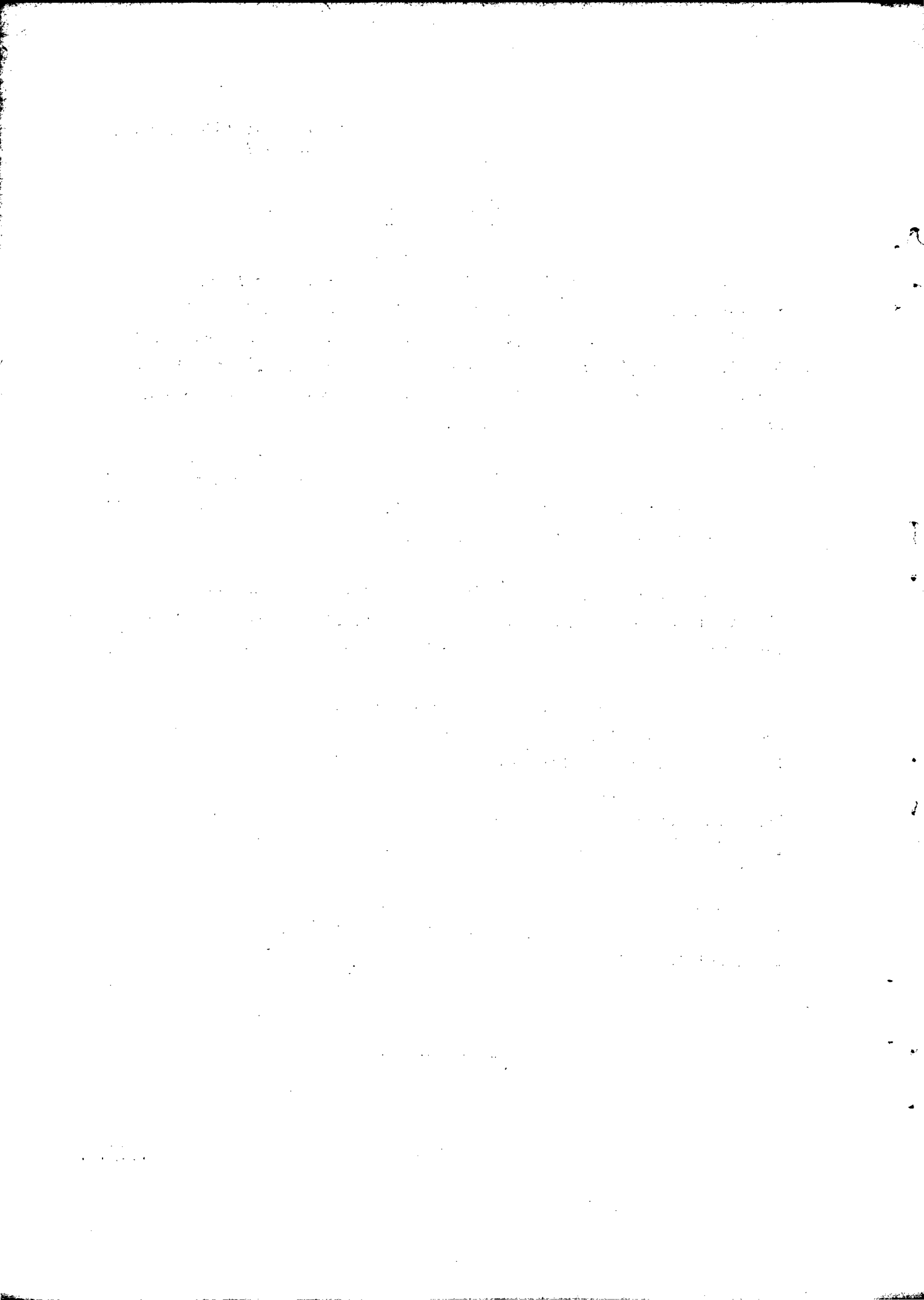
Le groupe a pour mission d'étudier les coûts marginaux d'usage, c'est-à-dire les coûts occasionnés par la circulation d'un véhicule supplémentaire. Son étude portera, d'une part, sur les dépenses de fonctionnement (éclairage, police, signalisation, etc.) et, d'autre part, sur les dépenses d'entretien et de renouvellement et notamment sur celles relatives à la chaussée.

Les coûts devront être étudiés pour différents niveaux de trafic ainsi que pour différents modes d'exploitation, les installations d'infrastructure étant considérées comme données.

L'étude devra permettre d'aboutir à déterminer des coefficients d'équivalence sur la base desquels il puisse être procédé à l'imputation aux différentes catégories de véhicules des coûts variant avec le trafic.

Avant de procéder à cette détermination, le groupe soumettra au Comité des propositions quant aux différentes méthodes pratiques selon lesquelles pourraient être appréhendés les coûts marginaux d'usage. Ces propositions devront notamment porter sur le problème de la fixation de l'ampleur des variations de trafic qu'il sera nécessaire de considérer pour dégager des résultats significatifs.

Dans son étude le groupe tiendra compte, en particulier, des résultats des essais routiers AASHO effectués aux Etats-Unis et en précisera les conditions d'applicabilité aux routes européennes.





RAPPORT

présenté par M. Ing. J. BROUWERS,  
Rijkswegenbouwlaboratorium, DELFT

---

1. Introduction (1)

Il existe, pour le calcul de l'épaisseur d'un revêtement, des méthodes permettant de calculer cette épaisseur pour un trafic donné, c'est-à-dire pour des catégories données de charge par essieu et, à l'intérieur de ces catégories, pour un certain nombre d'applications de charges.

Le recours à ces méthodes s'impose évidemment si l'on recherche une clé permettant de répartir les coûts totaux de construction et d'entretien de l'infrastructure entre les diverses catégories d'usagers.

Ces méthodes doivent permettre de calculer l'épaisseur des couches constituant la chaussée D comme fonction des charges par zone  $P_1$ ,  $P_2$ , etc. ainsi que du nombre d'applications  $n_1$ ,  $n_2$ , etc. de ces mêmes charges. Si la chose est possible, d'autres paramètres tels que la pression des pneus des véhicules peuvent également entrer en ligne de compte.

Cette méthode se fonde sur l'hypothèse que l'épaisseur D est un critère du coût de la chaussée. Pour simplifier les calculs, nous admettons que l'épaisseur D est directement proportionnelle aux coûts de construction des différentes couches.

Ces relations ne sont évidemment applicables qu'à la répartition des coûts conditionnés par le "dimensionnement" de l'infrastructure, c'est-à-dire les coûts d'aménagement de la chaussée proprement dite et les coûts d'entretien entraînés par un redimensionnement. Ces coûts d'entretien couvrent en règle générale une fraction des coûts afférents à la reprofilation ou à la reconstruction.

---

(1) Un complément à cette introduction sera diffusé ultérieurement

Les résultats de l'"AASHO-Road Test" donnent, conformément à l'un des objectifs assignés à ces essais, une relation entre les variables précitées (D, P et n).

Ces relations sont le fruit de recherches approfondies et sont largement utilisées dans diverses méthodes de calcul. La découverte de relations utiles à la détermination de clés de répartition des coûts était d'ailleurs l'un des objectifs du test AASHO.

Le présent rapport présente les relations sous une forme simplifiée, mais néanmoins suffisamment précise pour le but poursuivi, et analyse ensuite les clés de répartition des coûts déterminées sur la base de différentes méthodes.

Ces clés de répartition se fondent toutes sur les résultats AASHO, mais sont en principe universellement applicables.

## 2. Calculs effectués sur la base des résultats AASHO

### 2.1. Données générales

Pour mener à bien ces essais, des pistes d'essai en béton asphaltique et en béton de ciment ont été parcourues régulièrement pendant 25 mois (de novembre 1958 à décembre 1960) par des camions d'un type et d'un poids définis avec précision. A la fin des essais, le nombre total d'applications de charges s'élevait à  $1,1 \times 10^6$ . Toutes les conditions ont, dans toute la mesure du possible, été identiques pour les pistes d'essai. Au total, 6 pistes d'essai à 2 voies ont été construites; 5 d'entre elles (10 voies) ont été parcourues par une série de camions d'un poids et d'une disposition d'essieux déterminés. Chaque piste d'essai a donc été parcourue par des véhicules ayant une charge par essieu identique supportée soit par des essieux simples (à routes jumelées) portant chacun 0,9, 2,7, 5,4, 8,2, 10,2 et 13,6 t ou par des essieux tandem (également à roues jumelées) portant 6,9, 14,5, 18,2 ou 21,8 t.

Les pistes principales étaient constituées d'un grand nombre de sections d'essai en béton sur couche de fondation en mélange de sable et de gravier et de sections d'essai en béton asphaltique sur couche de base en matériaux concassés calibrés et couche de fondation en mélange de sable et de gravier. L'épaisseur de ces couches variait dans de très larges proportions puisqu'elle allait, pour les chaussées souples, de 2,5 cm d'asphalte posé directement sur le sous-col à 15 cm d'asphalte + 22,5 cm de couche de base en matériau concassé + 40 cm de couche de fondation en mélange de sable et de gravier et, pour les chaussées rigides, de 6,5 cm de béton posé directement sur le sous-sol à 32 cm de béton sur 22,5 cm de couche de fondation en sable et gravier.

Les pistes d'essai les plus minces ou les plus épaisses ont évidemment été réservées aux camions respectivement les plus légers et les plus lourds, mais l'application de ce principe était toutefois

loin d'être absolue.

L'appréciation périodique des pistes a pris la forme du calcul de l'indice de qualité (Present Serviceability Index)  $p$  sur la base de mesures des irrégularités longitudinales et transversales, des fissures et des réparations. L'appréciation s'est traduite par l'attribution d'une note entre 1,5 et 5,5 étant considéré comme excellent et 1,5 comme à ce point mauvais que la piste ne faisait plus l'objet d'appréciations ultérieures et était exclue des essais. Pendant ceux-ci, on s'est efforcé de déterminer le nombre d'applications de la charge par essieu considérée que la piste avait supportées jusqu'à ce que  $p$  soit égal à 2,5 ou à 1,5. Le calcul de l'indice de qualité  $p$  sur la base des mesures précitées avait au préalable été mis en parallèle avec une appréciation (subjective) d'un certain nombre d'automobilistes qui avaient attribué à divers tronçons de routes existantes des notes de qualité raisonnablement concordantes. En conséquence, le calcul du  $p$  des sections d'essai est la meilleure approximation possible de la détermination de ce même  $p$  par une équipe d'experts, détermination rendue impossible par la faible longueur des sections d'essai.

Au début des essais,  $p$  oscillait pour les différentes sections entre 4,2 et 4,5, valeur correspondant à celle d'une "bonne" chaussée nouvelle. On admet actuellement aux Etats-Unis qu'une route où  $p$  est égal à 2 (parfois à 2,5) se trouve dans un état tel qu'il est nécessaire de procéder à sa reprofilation ou à sa reconstruction.

Il convient encore de signaler qu'on avait construit, en plus des deux ensembles principaux de sections d'essai, un petit nombre de sections spéciales dont certaines reposaient sur des fondations traitées au bitume (épaisseur totale de l'asphalte variant de 12,5 à 55cm) et d'autres consistaient en une couche de 7,5 à 10 cm d'asphalte appliquée sur des fondations de 5 à 33 cm en sable et gravier liés au ciment. Ces sections avaient été incorporées dans les pistes destinées à tous les camions, à l'exception des deux types les plus légers (3,9 t et 2,7 t de charge par essieu). En revanche, les deux pistes réservées

à ces véhicules légers comportaient des sections qui avaient reçu un enduit bicouche plutôt que du béton asphaltique.

Les résultats des séries principales sont résumés en formules qui expriment aussi bien que possible la relation existant entre l'indice de qualité  $p$ , la charge par essieu  $2P$  ( $P$  = charge par roue), le nombre d'applications de charges  $n$  et l'épaisseur  $D$ .

Les relations les plus utiles donnent le rapport existant entre  $D$ ,  $P$  et  $n$ ,  $D$  étant généralement présenté comme fonction de  $n$  pour les diverses charges par essieu et pour des valeurs déterminées de  $p$ . On peut ainsi déduire de la figure 1 annexée au présent rapport combien d'applications de la charge par essieu  $2P$  une chaussée souple d'épaisseur  $D$  peut supporter avant que son indice de qualité  $p$  ne tombe de 4,5 environ à 2,5. Inversement, on peut en déduire quelle épaisseur la chaussée doit avoir pour supporter un nombre donné d'applications de la charge par essieu  $2P$  avant que  $p$  ne tombe à 2,5. Dans ces graphiques et formules, l'épaisseur des chaussées souples est donnée sous forme d'un indice d'épaisseur  $D = 0,173 h_1 + 0,055 h_2 + 0,043 h_3$ , dans lequel  $h_1$ ,  $h_2$  et  $h_3$  représentent respectivement l'épaisseur en cm de la couche de béton asphaltique, de la couche de base en matériaux concassés et de la couche de fondation en sable et gravier. Cette formule est également déduite des résultats des essais dans lesquels on a fait varier l'épaisseur des trois couches les unes par rapport aux autres. Le résultat a été cette épaisseur (fictive)  $D$  dans laquelle interviennent les trois couches composant la chaussée, pondérées d'après leur contribution à la force portante d'ensemble de la chaussée. Pour les sections d'essai en béton,  $D$  représente l'épaisseur de la dalle en cm.

Nous arrêterons ici ce bref résumé. On se référera aux textes originaux pour une description détaillée des conditions dans lesquelles l'AASHO Road Test a été effectué ainsi que les résultats auxquels

il a abouti (1).

## 2.2. Formules de dimensionnement déduites des résultats AASHO

Si l'on effectue des coupes horizontales (D étant constant) dans les graphiques de dimensionnement AASHO qui donnent D comme fonction de n pour diverses valeurs de P jusqu'à p = 2,0 ou 2,5 (figure 1), la relation entre n et P est représentée avec une approximation suffisante par  $n = a_1 P^{-b_1}$  (D = constant). On obtient en effet des parallèles pour log n en tant que fonction de log P. Dans ce cas,  $b_1$  est toujours égal à 4 environ (faible dépendance de D) et  $a = f(D)$ .

On peut écrire aussi que pour une épaisseur D constante de la chaussée, le nombre admissible d'impositions de deux charges par roue est inversement proportionnel à la puissance 4 de ces charges.

$$n_{P_1} : n_{P_2} = \frac{1}{P_1^4} : \frac{1}{P_2^4} = P_2^4 : P_1^4$$

Il s'indique tout naturellement de déterminer de cette façon des facteurs d'équivalence permettant de convertir le nombre d'applications des différentes charges par roue en un nombre d'applications de charges types par roue.

Si l'on adopte comme étalon une charge de 4 tonnes par roue, ce facteur d'équivalence est :

$$f_i = \frac{\text{nombre admissible d'applications de la charge de } i \text{ tonne par roue}}{\text{nombre admissible d'applications de la charge de 4 tonnes par roue}}$$

(1) Highway Research Board, Special Report 61 A t/m F (1962).

ce facteur est la moyenne de plusieurs coupes horizontales (pour différentes valeurs de D) dans le graphique représentant D comme fonction de (n) (cf. figure 1). Il semble que la relation simple entre  $f_1$  et P est quasi indépendante de D et qu'on obtient donc pour quelques essieux

$$f_1 = \left[ \frac{P_1}{4} \right]^4, \text{ c'est-à-dire une droite pour } \log f_1 \text{ comme fonction de } \log P.$$

Pour les essieux tandem, on obtient une parallèle à cette droite (comme moyenne de D = 2 à 6) qui peut être représentée par

$$f_{it} = \left[ \frac{P_{it}}{7,5} \right]^4, \text{ formule dans laquelle } P_{it} \text{ représente la moitié de la}$$

charge par essieu tandem (cf. notes (1) et (2) et figure 2).

Il est ainsi possible de convertir un trafic hétérogène dont on connaît le nombre d'applications des diverses catégories de charges par roue en un nombre équivalent d'applications de la charge type de 4 tonnes par essieu.

Les facteurs d'équivalence suivants, qui peuvent être déduits du graphique AASHO, ne diffèrent guère de la relation exacte  $P^4$ .

Pour  $p = 2,0$ , on obtient approximativement les mêmes résultats que pour  $p = 2,5$ .

- 
- (1) J. BROUWERS, Studie-Centrum Wegenbouw, Jaarverslag 1962, 93-8 (1963).
  - (2) J. BROUWERS, en C. van de FLIERT, Wegen 37, 328-30 (1963).

Charges par roue (en tonnes)	$f_i(t)$	$p = 2,5$	facteur d'équi-	valence asphalte	$f_{it} = \left(\frac{P_t}{7,5}\right)$
Essieu simple	(moitié de la charge par essieu tandem)		pour 4 t de charge type par roue déterminé graphiquement		
0,5(0-1)	-	0,0005		0,00025	-
1,5(1-2)	-	0,025		0,020	-
2,5(2-3)	5 (4-6)	0,15		0,15	0,19
3,5(3-4)	6,5(6-7)	0,5		0,58	0,56
4,5(4-5)	8 (7-9)	1,5		1,6	1,3
5,5(5-6)	10 (9-11)	3,5		3,6	3,2
6,5(6-7)	12 (11-13)	6,5		7,0	6,6

Pour un trafic à structure donnée, il est possible de calculer ainsi le nombre total d'applications d'une charge équivalente à 4 tonnes pendant la durée de vie prévue pour la chaussée par la formule

$$N_{eq4t} = n_1 f_1 + n_2 f_2 + \dots \text{ etc.} = \sum n_i(t) f_i(t)$$

Si l'on exprime la structure du trafic indiquant le pourcentage d'applications effectué par les différentes catégories de charge par essieu  $q_i$ ,  $q_i$  étant égal à  $\frac{n_i}{N} \cdot 100\%$  et que N est la somme des applications de charges de tous les essieux ( $N = \sum n_i$ ) on obtient

$$N_{eq4t} = \frac{N}{100} \sum q_i(t) f_i(t)$$

La valeur théorique de N est calculée en additionnant le nombre d'applications de charges (sur la voie ayant le trafic le plus dense) pendant la durée de vie prévue.



Si l'on représente log D (au lieu de D dans le graphique connu de l'AASHO) (figure 1) comme fonction de log n pour des valeurs constantes de P, on trouve, avec une approximation suffisante, des droites, de sorte que les courbes peuvent être représentées par  $D = a_2 n^{b_2}$  (P = constant). Dans cette égalité,  $b_2$  est toujours de 0,7 environ et  $a_2$  est une fonction de P.

Pour P = 4 tonnes (charge type par zone admise),  $b_2 = 0,17$  et  $a_3 = 0,40$  (si p = 2,0) de sorte que :

$$D = 0,40 N_{eq4t}^{0,17} = 0,40 N_{eq4t}^{1/6}$$

= indice d'épaisseur pour la totalité du trafic prévu.

On obtient ainsi la formule AASHO de dimensionnement simplifiée pour les chaussées souples :

$$D = 0,40 \left( \frac{N}{100} \right)^{1/6} \left[ \sum q_i(t) f_i(t) \right]^{1/6} = K \left[ \sum q_i(t) f_i(t) \right]^{1/6}$$

(K = constant).

Pour les pistes en béton, on peut calculer globalement une relation correspondante dans laquelle le coefficient est de 1,6 et les valeurs de  $f_i(t)$  légèrement différentes.

Pour les essieux exclusivement simples, on peut remplacer  $f_i$  par

$$\left( \frac{P_i}{4} \right)^4$$

la formule de dimensionnement devenant dans ce cas :

$$D = 0,40 \left( \frac{N}{100} \right)^{1/6} \left( \frac{1}{4} \right)^{2/3} \left[ \sum q_i P_i^4 \right]^{1/6} = K^1 x \left[ \sum q_i P_i^4 \right]^{1/6}$$

Les constantes K et  $K^1$  sont déterminées par le nombre total d'applications de charges pendant la durée de service prévue.

Dans leur forme générale - D = fonction de q et P (ou f) - exprimant l'épaisseur de la chaussée en tant que fonction de la distribution des fréquences relatives de catégories données de charge

par essieu, ces formules offrent le point de départ voulu pour le calcul d'une clé générale de répartition des coûts.

Il y a lieu de souligner que cette formule n'est qu'une "bonne" approximation. Par sa forme simple, elle convient toutefois très bien pour le calcul de clés de répartition des coûts. La détermination de D à des fins de dimensionnement ne requiert cependant pas une formule aussi simplifiée. En général, il est donc préférable de la déterminer graphiquement à l'aide des graphiques AASHO.

La précision de ces graphiques n'est par ailleurs pas très grande. Ils indiquent que l'(indice d') épaisseur a 90% de chance de se situer entre  $D \pm 0,11 (D+1)$ , ce qui signifie en pratique que pour un nombre donné de passages d'une charge par essieu déterminée, une marge de sécurité de 14% environ dans l'épaisseur suffit pour assurer à la chaussée au moins la durée de service prévue. Inversement, on obtient la même marge de sécurité en divisant par 2,5 le nombre admissible d'applications de charges. Tout ceci provoque également une dispersion assez notable du coefficient de la relation  $f_1 = \left(\frac{P_1}{4}\right)^4$  (cf. figure 3).

Pour être complet, il convient encore de mentionner qu'on obtient, avec une approximation suffisante, des droites pour  $\log D$  comme fonction de  $\log P$  quand  $n$  est constant, c'est-à-dire  $D = a_3 P^{b_3}$  ( $n$  est constant).

Dans cette égalité,  $b_3$  est toujours d'environ  $2/3$  (dépendance assez faible de  $n$ ) et  $a_3$  est fonction de  $n$ .

Cette relation a notamment été décrite par MEYER (1). Elle peut également être interprétée comme suit : pour un nombre constant d'applications de charges, les épaisseurs nécessaires des chaussées se comportent comme  $D_{P_1} : D_{P_2} = P_1^{2/3} : P_2^{2/3}$  ( $n = \text{constant}$ ).

---

(1) D. MEYER, Strasse und Autobahn 15 (1964), 382-8.

2.3. Utilisation des formules pour le calcul d'une clé de répartition des coûts entre les charges par essieu

Dans le calcul d'une clé de répartition des coûts, une grande importance échoit à l'hypothèse selon laquelle les coûts de la chaussée, proprement dite sont, en première approximation, proportionnels à son épaisseur. Pour les routes entièrement construites en bitume, le meilleur moyen d'établir une relation linéaire est encore de se baser sur une construction composée de diverses couches de matériaux comparables. Sur les pistes d'essai souples de l'AASHO où la relation décrite est de  $D = 0,173 h_1 + 0,055 h_2 + 0,043 h_3$ , le calcul de la relation linéaire de D avec les coûts de construction est considérablement facilité par cette addition. En effet, il importe peu pour l'"épaisseur"  $D = \sum c_i h_i$ , égalité dans laquelle c représente la constante matériau de la couche d'épaisseur h, que l'on utilise par exemple 8 cm du matériau A avec  $c = 0,12$  ou 16 cm du matériau B avec  $c = 0,06$ .

Certains matériaux requièrent néanmoins, dans une certaine mesure, une épaisseur déterminée parce que dans ses graphiques de dimensionnement (figure 1), l'AASHO prescrit une épaisseur minimale de 5 cm pour l'asphalte et de 7,5 cm pour la couche de fondation. Cette addition a pour conséquence d'encourager le choix du mode de construction le moins cher : on construit la chaussée en utilisant si possible presque exclusivement le matériau dont le quotient du coefficient c et des coûts d'aménagement par cm d'épaisseur de couche est maximal. A titre d'exemple, nous comparons deux constructions composées toutes deux de 10 cm du matériau A et de 10 ou 40 cm du matériau B. Les constantes matériau  $c_A$  et  $c_B$  sont dans le rapport de 3 à 1 et les coûts par épaisseur de A et de B dans le rapport de 2 à 1. Les indices d'épaisseur et les coûts totaux des deux constructions sont alors dans le rapport respectif de 4 à 7 et de 1 à 2.

Il est possible de réaliser des constructions moins chères et techniquement équivalentes en utilisant respectivement  $13 \frac{1}{3}$  cm et  $23 \frac{1}{3}$  cm du matériau 1, auquel cas les indices d'épaisseur aussi

bien que les coûts totaux des deux constructions sont dans le rapport de 4 à 7.

Une relation  $D = \sum c_i h_i$  est d'ailleurs une conséquence logique de l'utilisation de matériaux différents pour la construction d'une chaussée multi-couches et peut être censée faire partie d'une bonne méthode de dimensionnement.

Pour les chaussées en béton, la relation entre les coûts et l'épaisseur sera toutefois clairement moins linéaire ; il faut en effet s'attendre à ce qu'une augmentation d'épaisseur s'accompagne d'une diminution relative des coûts.

Comme il a déjà été indiqué dans le tableau du paragraphe 3.2., on ventile le trafic en catégories de charge par roue (essieu simple) de 0, 1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5 tonnes etc. et en catégories correspondantes d'essieux tandem (moitié de la charge par essieu tandem). Cette ventilation par catégorie est en soi arbitraire, mais semble inévitable pour des raisons d'ordre pratique ; le nombre de catégories est également déterminé par la nature et la précision des données disponibles. Le choix de la valeur déterminante de P par catégorie (moyenne ou maximale) est en soi, également arbitraire. Si les données relatives au nombre des essieux simples et tandem participant au trafic présenté comme fonction de la charge par essieu sont suffisantes, il est judicieux d'en tenir compte dans une répartition.

Les véhicules sont répartis en n catégories de charges par roue (simple et tandem) à partir de la catégorie la plus basse 1 jusqu'à la catégorie n. Les charges par roue déterminantes dans ces catégories sont  $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ . Les facteurs d'équivalence de la charge par roue dans ces groupes sont  $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$ .

Le pourcentage de passages d'essieu dans ces catégories de charge par roue sont  $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ .

Nous exposerons dans les paragraphes qui suivent différents procédés généraux, à savoir les méthodes A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, et B, permettant de déterminer des clés de répartition des coûts sur la base de la formule de dimensionnement du paragraphe 2.2.

2.3.1. Méthode A<sub>1</sub>

Dans cette méthode, on calcule les épaisseurs de chaussée nécessaires exclusivement par les différentes catégories 1, 2, 3, etc. de charge par roue, en l'occurrence D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub> ..... D<sub>n</sub>. Les coûts d'aménagement de ces chaussées (par unité de longueur) sont dans le même rapport que D<sub>1</sub> : D<sub>2</sub> : D<sub>3</sub> ..... D<sub>n</sub>.

Imaginons maintenant que le trafic soit ventilé entre les diverses catégories de charge par roue et que ces catégories circulent sur des chaussées distinctes prévues pour une durée de service identique et dont l'épaisseur est donc respectivement de D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub>, etc. Admettons également que les rapports de fréquence qui sont respectivement de q<sub>1</sub> : q<sub>2</sub> : q<sub>3</sub> sur ces routes ne motivent pas une modification du rapport de longueur de ces différentes chaussées.

Le rapport entre les coûts totaux reste donc D<sub>1</sub> : D<sub>2</sub> : D<sub>3</sub> ..... D<sub>n</sub>, et les coûts totaux s'élèvent à D<sub>1</sub> + D<sub>2</sub> + D<sub>3</sub> + ..... D<sub>n</sub>.

Par suite de l'interpénétration des diverses charges par essieu, l'épaisseur D<sub>1,2,3,...,n</sub> réellement nécessaire au trafic hétérogène doit être calculée par la formule de dimensionnement.

Les coûts réels de la chaussée doivent donc être diminués du facteur  $\frac{D_1, 2, 3, \dots, n}{D_1 + D_2 + D_3 + \dots + D_n} = A$ . Il semble donc qu'on puisse à diminuer également d'un facteur similaire les coûts afférents aux diverses catégories de charge par essieu (de participants estimés équivalents) de telle sorte que la répartition des coûts entre les

catégories de charge par essieu soit également  $AD_1 : AD_2 : AD_3 \dots$

$AD_n = D_1 : D_2 : D_3 \dots D_n$  en cas de trafic hétérogène.

Si l'on utilise les formules de dimensionnement d'après lesquelles

$$D_1 = K \cdot q_1^{1/6} \cdot f_1^{1/6} ; D_2 = K \cdot q_2^{1/6} \cdot f_2^{1/6} \dots D_n = K \cdot q_n^{1/6} \cdot f_n^{1/6}$$

le rapport entre les coûts afférents aux catégories de charge par essieu devient

$$q_1^{1/6} f_1^{1/6} : q_2^{1/6} f_2^{1/6} : \dots : q_n^{1/6} f_n^{1/6} = 1 : \left( \frac{q_2 f_2}{q_1 f_1} \right)^{1/6} : \dots : \left( \frac{q_n f_n}{q_1 f_1} \right)^{1/6}$$

ce qui donne pour des essieux simples où  $f = \left( \frac{P}{L} \right)^4$

$$q_1^{1/6} P_1^{2/3} : q_2^{1/6} P_2^{2/3} : \dots : q_n^{1/6} P_n^{2/3} = 1 : \left( \frac{q_2}{q_1} \right)^{1/6} \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{2/3} : \dots : \left( \frac{q_n}{q_1} \right)^{1/6} \left( \frac{P_n}{P_1} \right)^{2/3}$$

$$\dots = 1 : \left( \frac{q_2 P_2^4}{q_1 P_1^4} \right)^{1/6} : \dots : \left( \frac{q_n P_n^4}{q_1 P_1^4} \right)^{1/6}$$

La clé de répartition des coûts par application d'essieu est obtenue en divisant chaque catégorie respectivement par  $q_1, q_2, \dots, q_n$  et est donc :

$$\frac{f_1^{1/6}}{q_1^{5/6}} : \frac{f_2^{1/6}}{q_2^{5/6}} : \dots : \frac{f_n^{1/6}}{q_n^{5/6}} = 1 : \left( \frac{q_1}{q_2} \right)^{5/6} \left( \frac{f_2}{f_1} \right)^{1/6} : \dots : \left( \frac{q_1}{q_n} \right)^{5/6} \left( \frac{f_n}{f_1} \right)^{1/6}$$

ou pour des essieux simples :

$$\frac{P_1^{2/3}}{q_1^{5/6}} : \frac{P_2^{2/3}}{q_2^{5/6}} : \dots : \frac{P_n^{2/3}}{q_n^{5/6}} = 1 : \left( \frac{q_1}{q_2} \right)^{5/6} \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{2/3} : \dots : \left( \frac{q_1}{q_n} \right)^{5/6} \left( \frac{P_n}{P_1} \right)^{2/3}$$

$$= 1 : \left( \frac{q_1^5 P_2^4}{q_2^5 P_1^4} \right)^{1/6} : \dots : \left( \frac{q_1^5 P_n^4}{q_n^5 P_1^4} \right)^{1/6}$$

2.3.2. Méthode A<sub>2</sub>

Cette méthode suit le raisonnement exposé au paragraphe 2.3.1., à cette différence près que la ventilation du trafic circulant sur les chaussées distinctes réservées respectivement à un trafic composé des charges par roue P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, etc. est censée avoir des conséquences sur la superficie nécessaire de la chaussée. On admet que le rapport entre ces superficies nécessaires correspondra à la dispersion de la fréquence des catégories de charge par roue, c'est-à-dire q<sub>1</sub> : q<sub>2</sub> : ... q<sub>n</sub>.

Les coûts des différentes chaussées appropriées aux charges par essieu, 1, 2, etc. sont alors dans le même rapport que q<sub>1</sub> D<sub>1</sub> : q<sub>2</sub> D<sub>2</sub> : q<sub>3</sub> D<sub>3</sub> : ..... q<sub>n</sub> D<sub>n</sub>.

Cette hypothèse ne tient donc pas compte du fait que les véhicules ayant une charge par essieu élevée auront probablement besoin d'une superficie de chaussée plus grande, mais il est en principe possible de recourir pour cela à un facteur de correction.

Dans ce cas, la répartition des coûts afférents aux catégories de charge par essieu devient, sur la base des formules de dimensionnement:

$$q_1^{7/6} f_1^{1/6} : q_2^{7/6} f_2^{1/6} : \dots : q_n^{7/6} f_n^{1/6} = 1 : \left(\frac{q_2}{q_1}\right)^{7/6} \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^{1/6} : \dots : \left(\frac{q_n}{q_1}\right)^{7/6} \left(\frac{f_n}{f_1}\right)^{1/6}$$

ou pour des essieux simples :

$$q_1^{7/6} P_1^{2/3} : q_2^{7/6} P_2^{2/3} : \dots : q_n^{7/6} P_n^{2/3} = 1 : \left(\frac{q_2}{q_1}\right)^{7/6} \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{2/3} : \dots : \left(\frac{q_n}{q_1}\right)^{7/6} \left(\frac{P_n}{P_1}\right)^{2/3}$$

La clé de répartition par application d'essieu devient dans ce cas égale à la clé de répartition pour les catégories de charge par essieu obtenues par la méthode A<sub>1</sub>.

2.3.3 Méthode B

Comme on dispose maintenant d'une formule de dimensionnement qui fait intervenir une équivalence de la charge par essieu, il est possible de déterminer l'épaisseur nécessitée par la totalité du trafic hétérogène pendant la durée de service prévue.

Elle sera de  $D_{1,2,3...n} = K \left( q_1 f_1 + q_2 f_2 + q_3 f_3 + \dots + q_n f_n \right)^{1/6}$ .

L'épaisseur nécessaire pour la fraction du trafic total représentée par la catégorie inférieure de charge par roue 1 est  $D_1 = K \left[ q_1 f_1 \right]^{1/6}$ .

L'épaisseur nécessaire pour la fraction du trafic total représentée par les catégories 1 et 2 réunies est de  $D_{1,2} = K \left[ q_1 f_1 + q_2 f_2 \right]^{1/6}$ .

Pour les catégories 1 + 2 + 3, elle est de :  $D_{1,2,3} = K \left[ q_1 f_1 + q_2 f_2 + q_3 f_3 \right]^{1/6}$  etc.

Pour l'imputation des coûts sur la base des catégories de charge par roue, on peut maintenant imaginer que la chaussée se compose des couches  $D_1; D_{1,2} - D_1; D_{1,2,3} - D_{1,2}; \dots; D_{1...n} - D_{1... (n-1)}$ .

L'épaisseur  $D_1$  est nécessaire pour la première catégorie, mais est également utilisée par toutes les autres. Il semble par conséquent raisonnable de n'imputer au total que  $\frac{q_1}{100} \times D_1$  des coûts totaux à la première catégorie de charge par roue.



Il sera imputé semblablement à la deuxième catégorie de charge par roue  $\frac{q_2}{100} \times D_1$ , à la troisième catégorie  $\frac{q_3}{100} \times D_1$ , etc.

L'épaisseur  $D_{1,2} - D_1$  est l'épaisseur supplémentaire nécessaire pour la deuxième catégorie de charge par roue, mais elle est également utilisée par la troisième catégorie ainsi que par les catégories suivantes. En conséquence, on imputera

$$\frac{q_2}{q_2 + q_3 + \dots + q_n} (D_{1,2} - D_1) \text{ à la deuxième catégorie,}$$

$$\frac{q_3}{q_2 + q_3 + \dots + q_n} (D_{1,2} - D_1) \text{ à la troisième catégorie, etc.}$$

L'épaisseur  $D_{1,2,3} - D_{1,2}$  est l'épaisseur supplémentaire nécessaire pour la troisième catégorie, mais elle est également utilisée par la quatrième ainsi que par les suivantes. En conséquence, on imputera

$$\frac{q_3}{q_3 + q_4 + \dots + q_n} (D_{1,2,3} - D_{1,2}) \text{ à la troisième catégorie,}$$

$$\frac{q_4}{q_3 + q_4 + \dots + q_n} (D_{1,2,3} - D_{1,2}) \text{ à la quatrième catégorie, etc.}$$

L'épaisseur  $D_{1,\dots,n} - D_{1,\dots,(n-1)}$  est, enfin, entièrement imputée à la même catégorie de charge par roue.

Au total, l'épaisseur imputable à la première catégorie est de

$$\frac{q_1}{100} D_1 \text{ à la deuxième catégorie de } \frac{q_2}{100} D_1 + \frac{q_2}{q_2 + q_3 + \dots + q_n} (D_{1,2} - D_1);$$

à la troisième catégorie de  $\frac{q_3}{100} D_1 + \frac{q_3}{q_2 + q_3 + \dots + q_n} (D_{1,2} - D_1) +$   
 $\frac{q_3}{q_3 + q_4 + \dots + q_n} (D_{1,2,3} - D_{1,2})$  ; etc. et au même groupe  $\frac{q_n}{100} D_1 +$   
 $\frac{q_n}{q_2 + q_3 + \dots + q_n} (D_{1,2} - D_1) + \frac{q_n}{q_3 + q_4 + \dots + q_n} (D_{1,2,3} - D_{1,2}) +$   
 $\frac{q_n}{q_4 + q_5 + \dots + q_n} (D_{1,2,3,4} - D_{1,2,3}) + \dots + (D_{1..n} - D_{1..(n-1)})$ .

Pour l'imputation des coûts par charge par roue, les formules précitées doivent être divisées par le pourcentage correspondant de passages, ce qui nous donne la relation suivante :

$$\frac{D_1}{100} = \frac{D_1}{100} + \left[ \frac{D_{1,2} - D_1}{q_2 + q_3 + \dots + q_n} \right] ; \left[ \frac{D_1}{100} + \frac{D_{1,2} - D_1}{q_2 + q_3 + \dots + q_n} + \frac{D_{1,2,3} - D_{1,2}}{q_3 + q_4 + \dots + q_n} \right] ;$$

$$\dots \dots \dots ; \left[ \frac{D_1}{100} + \frac{D_{1,2} - D_1}{q_2 + q_3 + \dots + q_n} + \frac{D_{1,2,3} - D_{1,2}}{q_3 + q_4 + \dots + q_n} + \frac{D_{1,2,3,4} - D_{1,2,3}}{q_4 + q_5 + \dots + q_n} + \right.$$

$$\dots \dots \dots + \left. \frac{D_{1..n} - D_{1..(n-1)}}{q_n} \right] = 1 ; \left[ 1 + \frac{100 (D_{1,2} - D_1)}{(q_2 + q_3 + \dots + q_n) D_1} \right] ; \left[ 1 + \frac{100 (D_{1,2} - D_1)}{(q_2 + q_3 + \dots + q_n) D_1} + \right.$$

$$\left. \frac{100 (D_{1,2,3} - D_{1,2})}{(q_3 + q_4 + \dots + q_n) D_1} \right] \dots \dots \dots ; \left[ 1 + \frac{100 (D_{1,2} - D_1)}{(q_2 + q_3 + \dots + q_n) D_1} + \frac{100 (D_{1,2,3} - D_{1,2})}{(q_3 + q_4 + \dots + q_n) D_1} + \right.$$

$$\left. \frac{100 (D_{1,2,3,4} - D_{1,2,3})}{(q_4 + q_5 + \dots + q_n) D_1} + \dots \dots \dots + \frac{100 (D_{1..n} - D_{1..(n-1)})}{q_n D_1} \right]$$

On peut ici remplacer  $D_i$  par  $\left( \sum f_i q_i \right)^{1/6}$  puisque K tombe ; la durée de service et le nombre d'applications de charge n'a donc pas d'influence, dans ce cas non plus sur les rapports de coûts. Si l'on prend pour  $f_i$  le rapport  $f_i = \left( \frac{P_i}{T} \right)^4$ , on peut remplacer  $D_i$  par  $\left( \sum q_i P_i^4 \right)^{1/6}$ .

2.3.4. Autres méthodes

Bien que nous nous étendrons encore sur les mérites des méthodes de calcul précitées, et sur ceux d'autres également, il convient de signaler ici que nombreux sont ceux qui proposent et appliquent les relations simples décrites au paragraphe 2.2. à savoir :

$n = a_1 P^{-4}$ , valable quand D est constant, et  $D = a_3 P^{2/3}$ , valable quand n est constant, pour le calcul de clés de répartition des coûts entre les charges par essieu.

La première est alors utilisée dans la forme

$$n_n : n_{n-1} : \dots : n_2 : n_1 = P_1^4 : P_2^4 : \dots : P_{n-1}^4 : P_n^4, \text{ c'est-à-dire}$$

que le nombre admissible d'applications de diverses charges par essieu est, à épaisseur égale, inversement proportionnel à  $P^4$ .

L'épaisseur (qui est proportionnelle au coût de la chaussée) n'apparaît pas dans cette relation (l'équivalence de la charge par essieu).

Cette relation est néanmoins très souvent proposée comme clé de répartition des coûts par application de charges. Par catégorie de

charges par essieu, la clé de répartition devient dans ce cas

$$q_1 P_1^4 : q_2 P_2^4 : \dots : q_n P_n^4$$

En général, cette clé de répartition est réservée à la seule partie amortissable des coûts de construction de la nouvelle chaussée ( $\frac{\text{valeur de remplacement}}{\text{durée de service en années}}$ ) ou à l'entretien conditionné par le dimensionnement (reconstruction, reprofilation et renforcement de la chaussée). Le fait que D (proportionnel aux coûts) ne figure pas dans cette relation est une raison suffisante pour mettre sérieusement en doute l'utilité de cette relation simple  $P^4$  comme clé de répartition des coûts. La relation avec  $P^4$  apparaît d'ailleurs sous une forme plus complexe dans la formule précitée de dimensionnement ou elle est notamment utilisée pour le calcul d'un nombre équivalent d'applications de charges.

Nous analyserons encore en détail dans les chapitres suivants les raisons pour lesquelles les résultats AASHO ne permettent pas d'appliquer la relation  $P^4$  dans cette forme simple même pas pour une répartition des coûts d'entretien.

La deuxième relation, qui donne  $D_1 : D_2 : \dots : D_n = P_1^{2/3} : P_2^{2/3} : \dots : P_n^{2/3}$  est valable quand n est constant et est limitée par cette condition.

Cette relation ne constitue donc pas une clé de répartition des coûts valable pour tout trafic hétérogène. Par contre, elle peut servir de clé de répartition de la fraction des coûts de construction de la chaussée représentée par les charges d'intérêt et, parfois aussi des coûts d'amortissement. Certains estiment même que cette relation  $P^{2/3}$  est utilisable pour les coûts d'entretien dépendant du dimensionnement.

En général, le raisonnement est alors le suivant : les épaisseurs nécessaires de la chaussée pour les charges par roue  $P_1, P_2, \dots$  sont dans le rapport de  $P_1^{2/3} : P_2^{2/3}, \dots$ . Les coûts afférents aux catégories de charges par roue ayant les fréquences  $q_1, q_2, \dots$  sont

alors répartis suivant  $q_1 P_1^{2/3}$  ;  $q_2 P_2^{2/3}$  ; etc., c'est-à-dire d'une façon comparable à celle de la méthode A<sub>2</sub>, sous cette réserve cependant que les épaisseurs D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, etc. destinées aux catégories ayant leur propre fréquence sont remplacées ici par les épaisseurs  $P_1^{2/3}$ ,  $P_2^{2/3}$ , etc. qui ne se vérifient que pour des valeurs égales de q (n). Cela aboutit à une clé de répartition par application de charges  $P_1^{2/3}$  ;  $P_2^{2/3}$  ; etc.

Meyer a proposé une variante intéressante de cette relation  $P^{2/3}$  pour la répartition de la fraction des coûts de construction représentée par les charges d'intérêt. Il subdivise l'épaisseur D de la chaussée destinée au trafic hétérogène en 5 couches d'épaisseur égale et calcule, en se fondant sur la formule  $D = a P^{2/3}$  que

$$\frac{1}{5} D : \frac{2}{5} D : \frac{3}{5} D : \frac{4}{5} D : \frac{5}{5} D = P_{0,5t}^{2/3} : P_{1,5t}^{2/3} : P_{2,5t}^{2/3} : P_{4t}^{2/3} : P_{5,5t}^{2/3}$$

Il impute à chacune de ces couches 20% des coûts qu'il répartit pour la première couche entre toutes les catégories de charges par roue, pour la deuxième couche entre les catégories supérieures à 0,5 t, pour la troisième couche entre les catégories supérieures à 1,5t, pour la quatrième couche entre les catégories supérieures à 2,5 t et pour la couche de surface sur la catégorie supérieure à 4 t. Pour chaque couche, les coûts sont répartis entre les diverses catégories proportionnellement au nombre d'applications de charges qu'elles effectuent.

Il est possible de donner à cette méthode de calcul une forme générale montrant que la clé de répartition correspond, dans la forme, à celle de la méthode B sous cette réserve que dans toutes les formules, D<sub>1</sub>, D<sub>1,2</sub>, D<sub>1,2,3</sub>, etc. doivent être remplacées par  $P_1^{2/3}$ ,  $P_2^{2/3}$ ,  $P_3^{2/3}$ , etc.

Cette méthode présente l'inconvénient que malgré la répartition "graduelle" semblable à celle de la méthode B, la circulation des catégories de charges par essieu ne se répartit pas sur les épaisseurs nécessaires aux diverses catégories de trafic hétérogène (méthode B),

mais sur des épaisseurs nécessaires à la charge la plus lourde apparaissant dans les diverses catégories (comme dans la méthode A élaborée pour un trafic homogène 1), tandis que dans le calcul de cette épaisseur, il n'est pas tenu compte des différences de fréquence ( $q$ ) des charges par essieu considérées.

Etant donné que la combinaison imprécise et arbitraire des relations simples  $P^4$  et  $P^{2/3}$  permet d'obtenir des résultats qui se situent entre les résultats extrêmes de ces différentes relations, chacune des deux clés a servi, à titre d'exemple, à répartir une moitié des coûts totaux dans le paragraphe 3.

Il est intéressant, enfin, de déterminer la clé de répartition sur la base d'une répartition  $\sqrt{P}$  (méthodes classiques de dimensionnement pour des pressions de pneus égales), d'une répartition  $P$  (simple et peut-être applicable à des problèmes de répartition moins facilement analysables) et de répartition  $P^3$  et  $P^5$  (autres formules d'équivalence de charge par essieu).

#### 2.4. Exemples de calcul des clés de répartition des coûts

##### 2.4.1. Exemple numérique simplifié

La ventilation la plus simple d'un trafic hétérogène le subdiviserait en deux catégories : les voitures de tourisme et les camions.

Si l'on attribue à la catégorie des voitures de tourisme une charge par roue de 0,5 t et à tous les camions une charge moyenne par roue de 3 t, si l'on admet en outre que sur le plan des applications de charges, le trafic hétérogène comprend 70% de charges de 0,5 t (voitures de tourisme) et 30% de charges de 3 t (camions),  $P_1 = 0,5$  t;  $P_2 = 3$  t;  $q_1 = 70$ ;

$$q_2 = 30.$$

Le tableau suivant reprend les diverses clés de répartition des coûts pour ces deux catégories (voitures de tourisme et camions) ainsi que pour l'application unique de la charge de P<sub>1</sub> par rapport à P<sub>2</sub>.

Clé de répartition	Répartition des coûts par catégorie		Répartition des coûts par application de charges voiture de tourisme/camion (passage)
	Voitures de tourisme/camions	Pourcentage des coûts pour les voitures de tourisme	
A1	1 : 2,9	26	1 : 6,7
A2	1 : 1,2	45	1 : 2,9
B	1 : 3,1	24	1 : 7,2
P <sup>4</sup>	1 : 555	0,2	1 : 1295
P <sup>2/3</sup>	1 : 1,4	42	1 : 3,3
P <sup>4</sup> (50%) et P <sup>2/3</sup> (50%)	1 : 3,3	23	1 : 7,6
Meyer	1 : 3,7	21	1 : 8,7
√P	1 : 1	50	1 : 2,4
P	1 : 2,6	28	1 : 6
P <sup>3</sup>	1 : 93	1,1	1 : 216
P <sup>5</sup>	1 : 3330	0,03	1 : 7770

Dans ce cas les clés de répartition des coûts A1, A2 et B sont toujours calculées sur la base des formules de dimensionnement avec

$$f_1 = \left( \frac{P_1}{4} \right)^4$$

$$\text{On obtient } D_{0,5t} = D_1 = K \left[ 70 \cdot \left( \frac{0,5}{4} \right)^4 \right]^{1/6} = 0,508 K.$$

$$D_{3t} = D_2 = K \left[ 30 \cdot \left( \frac{3}{4} \right)^4 \right]^{1/6} = 1,455 K.$$

$$D_{\text{tot}} = D_{1,2} = K \left[ 70 \cdot \left( \frac{0,5}{4} \right)^4 + 30 \cdot \left( \frac{3}{4} \right)^4 \right]^{1/6} = 1,456 K.$$

Par conséquent, la clé de répartition A1 par roue est de 0,508 : 1,455 = 1 : 2,9 par catégorie de charge et de  $\frac{0,508}{70} : \frac{1,455}{30} = 1 : 6,7$ . par passage d'essieu.

La clé de répartition A2 est de (70 . 0,508) : (30 . 1,455) = 1,2 par catégorie de charge par roue et de 1 : 2,9 par passage d'essieu.

La clé de répartition B est de 0,7 x 0,508 : [0,7 x 0,508] : [(0,3 x 0,508) + (1,455 - 0,508)] = 1 : 3,1 par catégorie de charge par roue et de  $\frac{1}{70} : \frac{3,1}{30} = 1 : 7,2$  par passage d'essieu.

La clé de répartition obtenue par la méthode Meyer est de [(0,7.0,63 : (0,3.0,63) + (2,08-0,63)] = 1 : 3,7 par catégorie de charge par roue et de  $\frac{1}{70} : \frac{3,7}{30} = 1 : 8,7$  par passage d'essieu.

#### 2.4.2. Répartition plus différenciée des charges par essieu

En vue d'illustrer la relative simplicité des calculs, nous avons développé l'exemple suivant qui nous semble répartir les charges par essieu de façon réaliste.

H y p o t h è s e s			
Catégorie de charge par essieu	Charge pour roue déterminante	Pourcentage des applications de charges dans la catégorie	$\left( \begin{matrix} q_i & P_i \end{matrix} \right)^{1/6}$
0-1 ton	$P_1 = 0,5 \text{ t}$	$q_1 = 60\%$	1,25
1-2 "	$P_2 = 1,5 \text{ t}$	$q_2 = 25\%$	2,24
2-3 "	$P_3 = 2,5 \text{ t}$	$q_3 = 10\%$	2,70
3-4 "	$P_4 = 3,5 \text{ t}$	$q_4 = 3\%$	2,77
5-6 "	$P_5 = 4,5 \text{ t}$	$q_5 = 2\%$	3,30



$$\left( q_1 P_1^4 + q_2 P_2^4 \right)^{1/6} = 2,26$$

$$\left( q_1 P_1^4 + q_2 P_2^4 + q_3 P_3^4 \right)^{1/6} = 2,84$$

$$\left( q_1 P_1^4 + q_2 P_2^4 + q_3 P_3^4 + q_4 P_4^4 \right)^{1/6} = 3,15$$

$$\left( q_1 P_1^4 + q_2 P_2^4 + q_3 P_3^4 + q_4 P_4^4 + q_5 P_5^4 \right)^{1/6} = 3,485$$

Les deux clés de répartition des coûts sont une fois de plus calculées semblablement d'après les diverses méthodes.

Clé de répartition	Répartition des coûts par catégorie - catégorie P <sub>1</sub> ; catégorie P <sub>2</sub> ; catégorie P <sub>3</sub>	Répartition des coûts par application de charges de P <sub>1</sub> ; de P <sub>2</sub> ; de P <sub>3</sub> etc.
A1	1 : 1,80 : 2,15 : 2,2	1 : 4,3 : 13 : 44 : 79
A2	1 : 2,65	1 : 1,8 : 2,15 : 2,2 : 2,65
B	1 : 1,25 : 1,0 : 0,55 : 0,92	1 : 3,0 : 6,1 : 11,1 : 27,7
P <sup>4</sup>	1 : 34 : 104 : 120 : 219	1 : 81 : 625 : 2400 : 6560
P <sup>2/3</sup>	1 : 0,9 : 0,5 : 0,2 : 0,14	1 : 2,1 : 2,9 : 3,7 : 4,3
P <sup>4</sup> (50%) et P <sup>2/3</sup> (50%)	1 : 0,9 : 6,3 : 3,6 : 4,6	1 : 2,2 : 3,8 : 7,2 : 13,7
Meyer	1 : 1,5 : 1,6 : 1,9	1 : 3,7 : 9,3 : 22,5 : 56
P	1 : 1,7 : 2,2 : 2,6 : 3,0	1 : 1,7 : 2,2 : 2,6 : 3,0
P	1 : 3 : 5 : 7 : 9	1 : 3 : 5 : 7 : 9
P <sup>3</sup>	1 : 27 : 125 : 343 : 730	1 : 27 : 125 : 343 : 730
P <sup>5</sup>	1 : 243 : 3125 : 16.800 : 59.000	1 : 243 : 3125 : 16.800 : 59.000

**2.5. Analyse des différentes clés de répartition**

**2.5.1. Clé de répartition des coûts par véhicule**

Il y a lieu de noter que dans les exemples donnés au paragraphe 2.4., les hypothèses avancées pour q<sub>1</sub> et q<sub>2</sub> ou q<sub>1</sub> à q<sub>5</sub> sont des exemples numériques arbitraires. Si l'on a effectué une répartition

en catégories de charge par essieu, les valeurs de  $q$  sont les seules données nécessaires aux calculs souhaités, quelle que soit la clé de répartition.

Les pourcentages nécessaires aux calculs définitifs devront être obtenus en déterminant le nombre annuel de kilomètres/véhicule par an de la catégorie de véhicule que l'on a l'intention de classer dans les catégories admises de charges par roue. Si le nombre de véhicules de la catégorie de charge par roue  $P_1$  est égal à  $A_1$  et le kilométrage annuel moyen des véhicules de ce groupe à  $B_1$  (km), on a

$$q_1 = \frac{A_1 B_1}{\sum AB} \cdot 100\% ; \quad q_2 = \frac{A_2 B_2}{\sum AB} \cdot 100\%, \text{ etc.}$$

Il est évidemment souhaitable d'adapter les valeurs de  $q$  aussi fidèlement que possible à l'évolution prévisible du trafic en déterminant par exemple  $q_1$  sur la base d'estimations de  $A_1, B_1, A_2, B_2$ , pour la totalité de la durée de service prévue de la chaussée (20 ans par exemple). Ces estimations pourront être plus sûres si elles se fondent sur une extrapolation de données connues et rassemblées depuis plusieurs années au sujet de ces chiffres.

La clé de répartition doit, en fin de compte, permettre une imputation par véhicule. Or, on peut obtenir la clé de répartition des coûts par véhicule en divisant par la valeur correspondante de  $A$  la part afférente à chacune des catégories de charges par essieu ( $x$ ), calculée d'après les diverses clés ou en multipliant par la valeur correspondante de  $B$  la part afférente à chacune des applications de charges ( $y$ ). En effet,  $y = \frac{x}{q} = \frac{x}{AB}$  et la part imputée à chaque véhicule peut être calculée comme étant  $\frac{x}{A}$  ou  $B_y$ .

Il s'ensuit également qu'on ne doit pas avoir de chiffres absolus pour  $A_1, A_2$ , etc. ou pour  $B_1, B_2$ , etc. mais uniquement des pourcentages.

Ce n'est que pour la clé simple  $P^4$  et  $P^{2/3}$  que l'on ne doit pas connaître A et B, mais uniquement B pour calculer la clé de répartition par véhicule. C'est ainsi qu'avec la clé  $P^4$ , on calcule la clé de répartition des coûts par véhicule, comme  $B_1 P_1^4$  :  $B_2 P_2^4$  : etc. (ou comme

$$\frac{q_1 P_1^4}{A_1} \text{ : } \frac{q_2 P_2^4}{A_2} \text{ etc.} = B_1 P_1^4 \text{ : } B_2 P_2^4 \text{ : etc.}).$$

Il est d'ailleurs moins simple de déterminer exactement B que A. En ce qui concerne la moyenne du nombre de véhicules A et des kilométrages annuels B pendant la durée d'existence prévue de la chaussée, une modification relative de A dans le temps sera probablement plus grande qu'une modification de B. L'éventualité la plus probable est en effet une augmentation du pourcentage de voitures de tourisme.

#### 2.5.2. Choix entre différentes clés de répartition

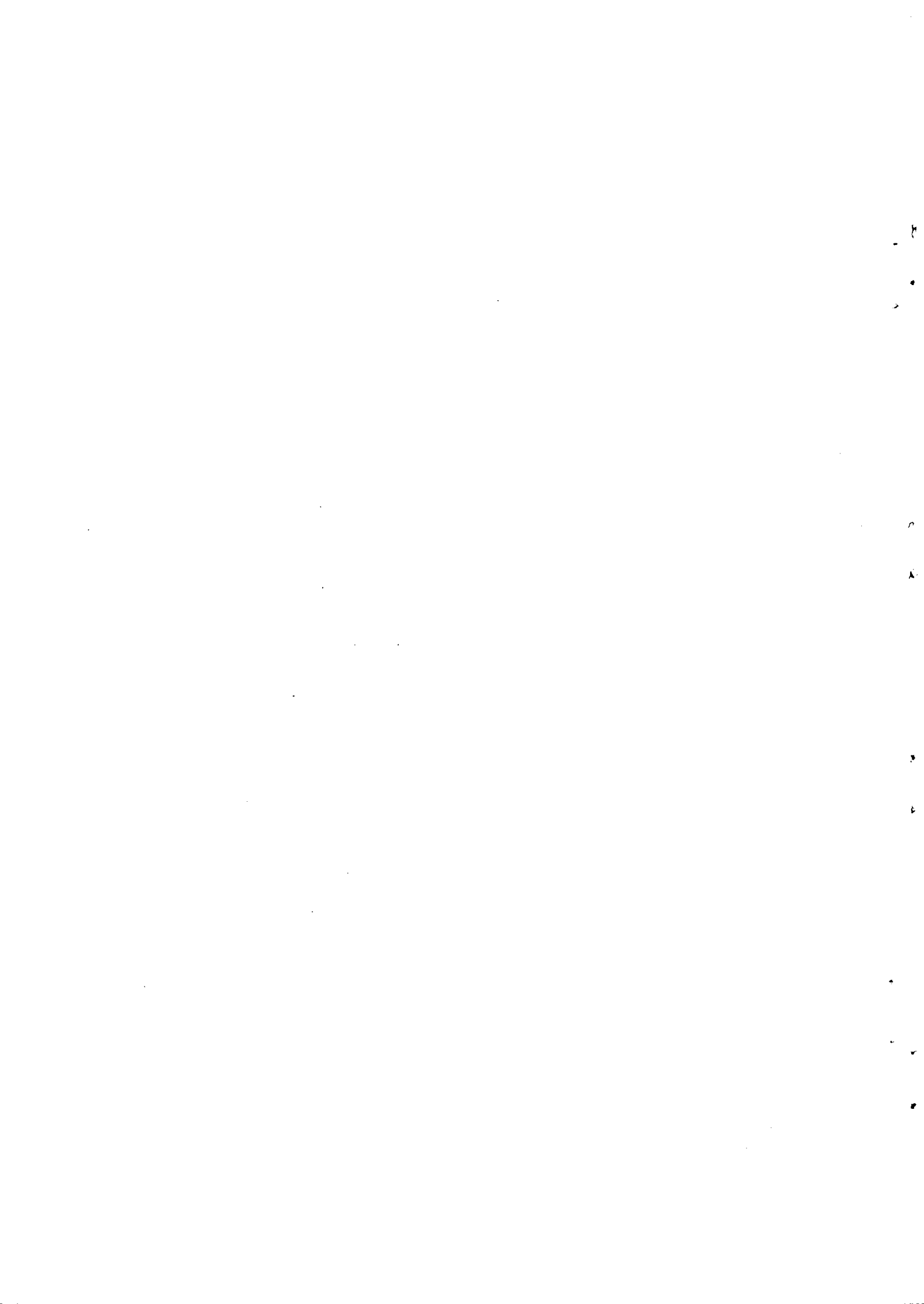
Les mérites des diverses méthodes apparaissent plus clairement quand on compare les résultats obtenus en modifiant, dans l'exemple simplifié du paragraphe 2,4., la fréquence des applications de charges des deux catégories (modification de  $\frac{q_1}{q_2}$ ).

Le tableau suivant reproduit les résultats du calcul des clés de répartition déterminées pour six variantes.



Répartition totale du pourcentage des applications de charges		Clés de répartition (voiture de tourisme : véhicule utilitaire)								
		Méthode A <sub>1</sub>	Méthode B	Méthode Meyer	Répartition P <sup>4</sup>	Répartit. P <sup>2/3</sup>				
q <sub>1</sub> voitures de tourisme	q <sub>2</sub> camions	par ca- tégorie (+)	par applica- tion de charges	par ca- tégorie	par applica- tion de charges	par ca- tégorie	par applica- tion de charges	par ca- tégorie	par applica- tion de charges	par applica- tion de charges
50	50	1:3,3	1:3,3	1:5,6	1:5,6	1:5,6	1:5,6	1:1295	1:1295	1:3,3
60	40	1:3,1	1:4,7	1:4,1	1:6,2	1:4,5	1:6,7	1:865	id.	id.
70	30	1:2,9	1:6,7	1:3,1	1:7,2	1:3,7	1:8,7	1:555	id.	id.
80	20	1:2,6	1:10,5	1:2,3	1:9,1	1:3,1	1:12,5	1:259	id.	id.
99	1	1:1,5	1:152	1:0,55	1:55	1:2,3	1:2281	1:13,1	id.	id.
99,925	0,075	1:1	1:1295	1:0,12	1:156	1:2,3	1:2980	1:1	id.	id.

(+) Par la méthode A<sub>2</sub> on obtient une répartition identique par charge.



Il ressort de ceci que la part imputée aux catégories diminue et que la part imputée aux charges par essieu augmente quand un accroissement du nombre de voitures de tourisme modifie le rapport de fréquence du nombre total d'applications de charges, sauf avec les clés  $P^4$  et  $P^{2/3}$  valables pour les applications de charges (cf. 2.5.1.). Les modifications sont faibles en cas d'une modification de  $70 \pm 10\%$  dans la répartition des fréquences.

Les calculs semblent d'ailleurs être valables également entre 60 et 80% de passages de voitures de tourisme, pourcentages qui peuvent être déduits des chiffres publiés relatifs au nombre de véhicules (A) et aux kilométrages annuels (B). Dans cet exemple, la clé de répartition des coûts par véhicule s'obtient d'ailleurs en divisant les chiffres qui indiquent dans le tableau les clés de répartition par application de charges par la moyenne correspondante des kilométrages annuels. Dans le cas, par exemple, où le kilométrage annuel moyen des véhicules de tourisme atteint 20.000 km/a et celui des camions 50.000 km/a, la clé de répartition par véhicule sera, pour  $q_1 = 70\%$ , 1 : 18 avec la méthode B.

Il ressort également du tableau que dans le cas où  $q_1 = q_2 = 50\%$ , c'est-à-dire quand le nombre d'applications de charges est le même pour les deux groupes, la clé de répartition  $A_1$  aboutit aux mêmes résultats que la clé de répartition  $P^{2/3}$ . Cela est facile à comprendre si l'on songe que  $q_1 = q_2$  signifie la même chose que  $n$  est constant, condition de validité de la relation  $P^{2/3}$ . Quand  $q_1 = q_2$ , la clé de répartition B donne également les mêmes résultats que la méthode déduite de la répartition proposée par Meyer. En effet, pour  $q_1 = q_2$ , la méthode B (essieux simples uniquement) donne la clé de répartition suivante par application de charges :

$$\left( \frac{qP_1^4}{100} \right)^{1/6} : \left[ \left( \frac{qP_1^4}{100} \right)^{1/6} + \frac{(qP_1^4 + qP_2^4)^{1/6} - (qP_1^4)^{1/6}}{q} \right] = 1/2 P_1^{2/3} :$$

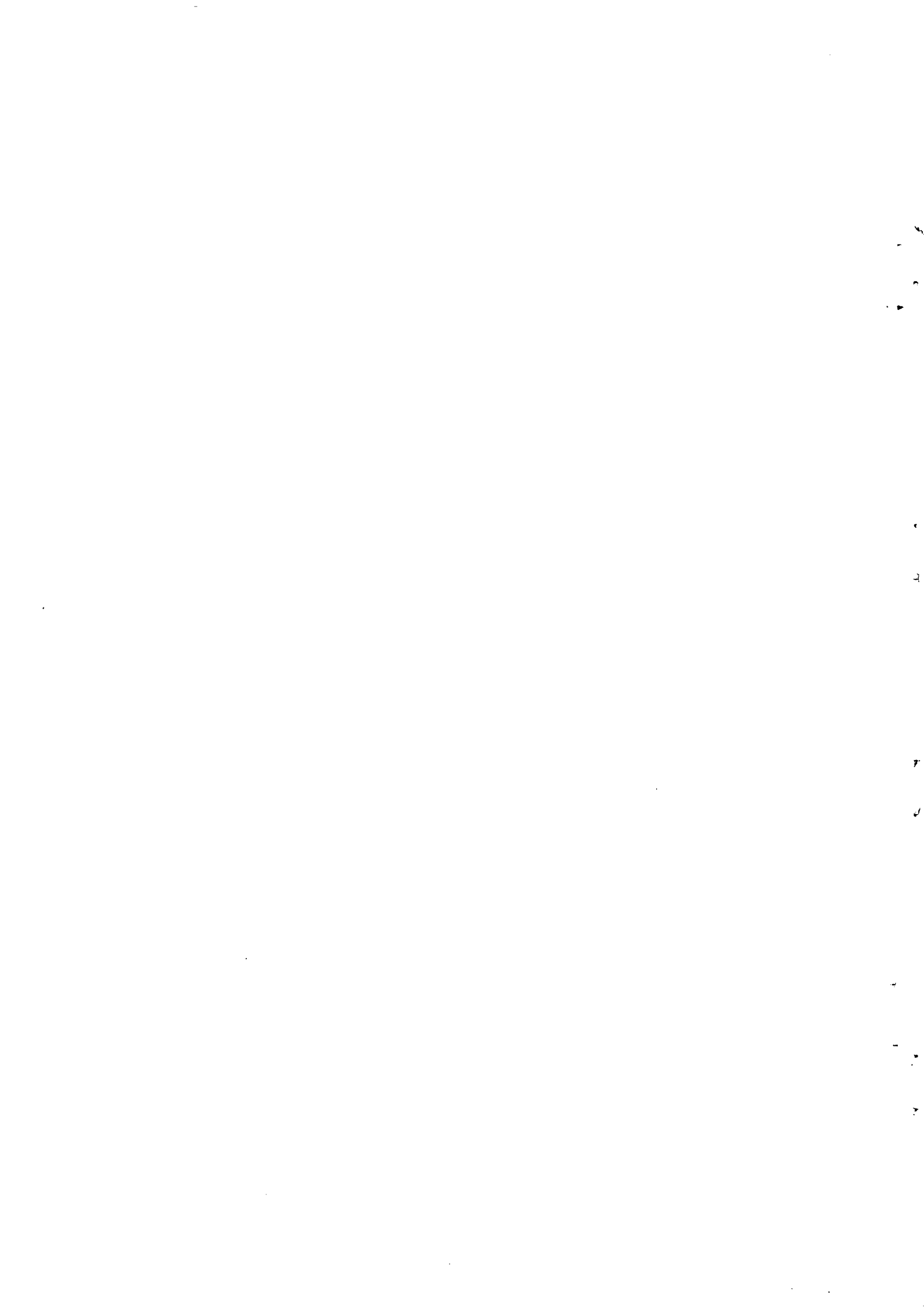
$$\left[ \frac{(P_1^4 + P_2^4)^{1/6}}{P_1^{2/3}} - 1/2 P_1^{2/3} \right] ,$$

Tableau B.

Résultats des essais pour l'essieu simple de 13,6 tonnes

structure de la chaussée			à la "destruction"			reconstruction			fin des essais		déflexion Benkelman sous une roue de 2,7 tonnes en u m	
$h_1-h_2-h_3$ cm	D	p	n ( $\times 10^{-3}$ )	$h'$	D'	p	p	nouveau nombre ( $\times 10^{-3}$ ) d'applications de charge		avant reconstruction	après reconstruction	
								constaté	admissible			
15-7½-40	4,8	1,2	702	7½	6,1	3,7	3,6	401	2.100	710	460	
12½-15-20	3,9	1,0	133	"	5,2	2,9	2,5	1.063	800	1.520	660	
12½-7½-20	3,9	1,3	135	"	5,3	3,6	3,4	1.063	850	1.370	560	
15½-22½-20	4,8	1,0	691	"	6,1	3,4	3,0	416	2.000	910	480	
15-7½-20	3,9	1,6	190	"	5,3	3,0	2,9	991	750	1.580	970	
10-7½-30	3,5	1,5	385	"	4,8	3,0	1,8	809	150	100	380	
10-15-20	3,5	0,9	86	"	4,8	3,4	2,0	1.111	450	2.260	760	
12½-15-30	4,4	1,5	725	6½	5,5	3,3	3,0	430	800	1.090	510	
12½-22½-20	4,3	1,6	584	9	5,9	3,4	3,2	502	1.600	860	610	
12½-7½-40	4,4	0,7	490	7½	5,7	2,5	2,7	502	1.200	710	580	
10-7½-40	3,9	1,7	183	"	5,3	2,5	2,2	981	750	1.190	610	
10-22½-20	3,9	0,5	83	"	5,2	3,8	3,7	1.114	850	2.190	660	
10-15-30	3,9	1,1	89	"	5,2	3,4	2,0	150	850	1.650	760	
15-15-20	4,4	1,1	145	"	5,7	3,5	2,1	1.035	1.550	1.400	860	
10-7½-40	3,9	1,3	113	"	5,3	3,4	2,6	1.089	850	1.270	920	
15-7½-30	4,4	1,6	153	"	5,7	3,5	2,1	909	1.550	970	610	



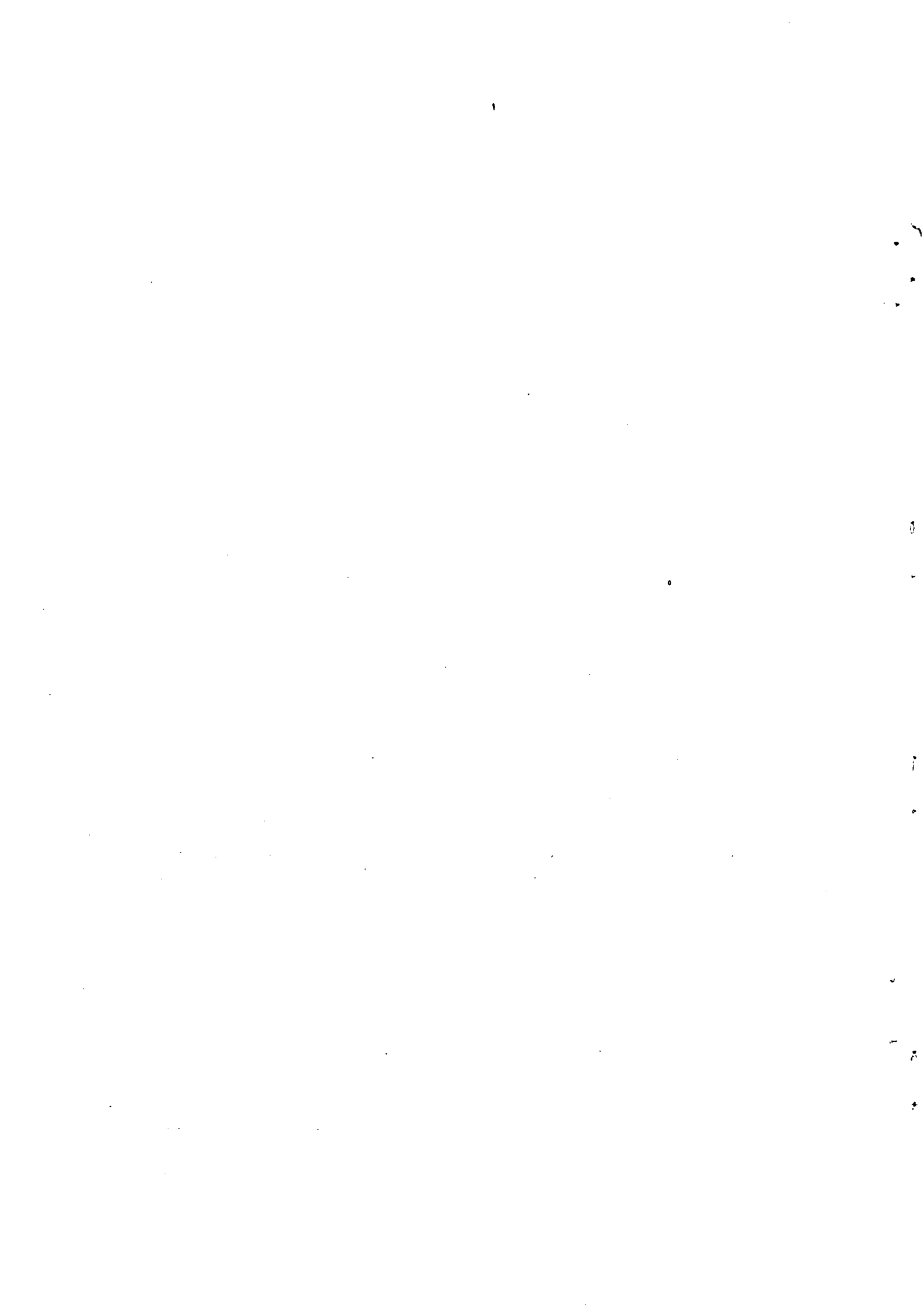


Essai AASHO de reconstruction  
Résultats moyens des sections asphaltées (par piste d'essai)

TABLEAU A

Piste d'essai N°	Charges par essieu simple T = (en t)	Structure moyenne de la chaussée		nombre moyen de sections d'essai	valeur de p		nombre d'applications de charges jusqu'à destruction (x10 <sup>-3</sup> )	reconstruction		valeur de p	nouveau nombre d'applications de charges		
		épaisseur asphaltée-béton-couche de base et gravier (h <sub>1</sub> -h <sub>2</sub> -h <sub>3</sub> ) en cm	id. indice d'épaisseur D		avant l'essai	finale équivalente à "des-truc-tion"		épaisseur en cm d'as-phalte h'	indice d'épaisseur après recon-struction D'		à la fin de l'essai AASHO	jusqu'à la fin des essais D' (x10 <sup>-3</sup> )	admis-sible d'après D' (x10 <sup>-3</sup> )
2	2,7	4 1/2 - 10 1/2 - 4	1,6	5	3,9	1,5	452	5	2,5	2,6	2,4	630	3000
3	5,4	7 1/2 - 9 - 16 1/2	2,5	5	3,8	1,5	314	8,5	4,0	3,2	3,0	613	4500
	10,9T	7 1/2 - 13 - 16	2,7	7	4,0	1,5	377	8,0	4,1	3,4	3,1	458	3500
4	8,2	9 1/2 - 7 1/2 - 23	3,1	12	4,2	1,5	381	8,0	4,5	3,5	2,8	642	2000
	14,5T	10 1/2 - 7 - 23	3,2	11	4,2	1,5	360	8,0	4,6	3,5	3,1	768	2500
5	10,2	10 - 16 - 19 1/2	3,5	15	4,4	1,5	257	7,5	4,8	3,5	2,9	765	1300
	18,2T	9 1/2 - 16 1/2 - 21	3,5	15	4,3	1,5	302	7,5	4,8	3,3	2,7	610	1400
6	13,6	12 1/2 - 13 - 28 1/2	4,1	16	4,2	1,5	305	7,5	5,4	3,3	2,7	785	800
	21,8T	12 - 13 1/2 - 29 1/2	4,1	13	4,2	1,6	477	8,0	5,5	3,5	3,3	589	1600

(\*) Représente n' - n, si l'on base sur l'hypothèse que D' = D·h'·c' (c' = c, = 0,175) et qu'on pouvait appliquer pour la reconstruction le graphique AASHO (p = 2,5) qui a servi à déterminer n' (après reconstruction p n'est cependant pas égal à p avant l'essai).



ce qui est identique à la clé de répartition déduite de la répartition proposée par Meyer, puisque dans ce cas,  $P_1^4 + P_2^4 \approx P_2^4$ . On peut également montrer que quand  $q_1$  tend vers 100%, cette clé de répartition tend vers 1 : 2,3 pour les catégories de charges par essieu

$$(1 : \frac{P_2^{2/3} - P_1^{2/3}}{P_1^{2/3}})$$

Dans le cas (hypothétique) extrême où le trafic se compose de 0,075% d'applications de charges d'essieux lourds, c'est-à-dire quand les applications de charges sont dans le rapport de  $nP_1 : nP_2 = q_1 : q_2 = 1 : 1295 = (0,5)^4 : (3)^4 = P_1^4 : P_2^4$ , la méthode  $A_1$  donne la clé de répartition  $P^4$ . Cela peut se comprendre si l'on songe que dans ce cas, les épaisseurs nécessaires pour les différentes charges par essieu sont égales

$$(D_1 = K (q_1 P_1^4)^{1/6} = D_2 = K (q_2 P_2^4)^{1/6})$$

Dans le cas simple donné où il n'existe que deux catégories de charges par roue et où  $D_2 \approx D_{1,2}$ , on peut inférer que la clé  $A_1$  aboutit exactement au même résultat que la clé B, quand

$$\frac{q_1}{q_2} \frac{D_2}{D_1} = \frac{q_1}{q_2} \frac{q_2 D_1 + (D_2 - D_1)}{\frac{q_1}{100} D_1} \quad \text{c'est-à-dire quand } \frac{q_1}{q_2} = \frac{D_2}{D_1}, \text{ égalité}$$

qui se vérifie quand  $\frac{q_1}{q_2} = \frac{P_2^{4/7}}{P_1} = 2,8$ . Dans ce cas,  $q_1 = 74\%$  et

$q_2 = 26\%$ , tandis que la clé de répartition est de 1 : 2,8 par catégorie et de 1 : 8,0 par application de charges.

S'il faut opérer un choix entre les diverses clés de répartition, il convient d'être attentif au fait qu'une répartition des coûts sera toujours plus ou moins arbitraire. Toutefois, le choix doit dans toute la mesure du possible être équitable et ne pas pécher par illogisme. L'utilisation de la relation simple  $P^4$  ne répond pas à cette dernière condition si, après avoir adopté l'épaisseur de la chaussée  $D$  comme critère des coûts, on prend comme base de calcul une relation entre  $P$  et  $q$  ( $n$ ) dans laquelle  $D$  ne figure pas.

Les objections qui peuvent être formulées contre cette relation  $P^4$  dans le cas où il s'agit uniquement de coûts d'entretien, sont exposées au paragraphe 2.6.

Les objections qui peuvent être formulées contre la clé  $P^{2/3}$  et contre la méthode Meyer, qui ne recourt pas assez aux possibilités offertes par les formules dérivées de dimensionnement, sont exposées au paragraphe 2.3.4.

La clé de répartition  $A_1$  donne dans les hypothèses extrêmes, des résultats plausibles qui présentent cependant des différences allant de 1 à 8 avec les résultats obtenus par la méthode B. Cet exemple extrême ne reproduit cependant pas la répartition moyenne des charges par essieu et ne peut présenter de l'intérêt que dans des cas spéciaux. En outre, on peut contester l'hypothèse formulée pour  $A_1$ , selon laquelle la superficie totale des diverses catégories de charges par essieu doit être égale si la superficie totale de la route est subdivisée en voies distinctes réservées aux différentes charges par essieu. La proportionnalité totale de la superficie nécessaire de la route et de la fréquence, telle qu'elle est admise en  $A_2$ , semble cependant être une hypothèse moins réaliste. Il semble donc que la clé de répartition puisse se situer entre  $A_1$  et  $A_2$ , en étant cependant beaucoup plus proche de  $A_1$  que de  $A_2$ . Un argument plaide cependant en faveur d'un glissement dans le sens de  $A_2$ , à savoir que si le réseau routier existant est suffisamment étendu, une forte augmentation du nombre de voitures de tourisme se traduit par un

agrandissement de la superficie des chaussées au bénéfice principal de ces voitures de tourisme (par exemple par l'adjonction de voies supplémentaires). On peut cependant alléguer, à charge de ce glissement, que toutes les charges par essieu peuvent utiliser ces revêtements.

La méthode B utilise les possibilités nouvelles offertes par les résultats AASHO, à savoir le calcul de l'épaisseur nécessaire à un trafic mixte. Il est possible désormais de fonder la répartition des coûts sur les épaisseurs supplémentaires nécessaires à l'adjonction de nouvelles catégories de charges par essieu. Dans ce cas également, on peut concevoir une modification par analogie avec  $A_2$  en tenant compte du fait que la superficie de la route diminue avec la fréquence des charges par essieu.

Cette façon de faire est cependant moins acceptable dans ce cas-ci parce que l'on se base sur une seule épaisseur convenant pour un trafic hétérogène moyen et que l'on examine ensuite dans quelle mesure elle peut être réduite quand sont successivement soustraites du trafic les différentes catégories de fréquences de charges par essieu. Il n'est d'ailleurs pas déraisonnable d'admettre qu'une partie déterminée de la longueur de la chaussée n'est parcourue que par la seule catégorie limitée de charges par essieu pour laquelle elle a été dimensionnée. Cette hypothèse est d'ailleurs le reflet exact de la réalité quand chaque route a un trafic à structure propre (différences de  $q$ ,  $P$  et  $K$ ). Si les données disponibles étaient suffisantes pour subdiviser la longueur totale du réseau en tronçons ayant chacun leurs propres  $q$  et  $P$ , il est évidemment possible de calculer les clés de répartition applicables sur ces tronçons et de les combiner en une clé de répartition globale (pondérée). Le calcul pourrait ainsi être plus exact, en restant d'ailleurs toujours fondé sur les formules de dimensionnement permettant de calculer l'épaisseur adéquate des différents tronçons.

Il semble actuellement raisonnable, si l'on veut simplifier, et nécessaire, puisque les données exactes font défaut, de fonder les calculs sur la répartition moyenne du trafic dans l'ensemble du pays et de procéder ensuite de la façon décrite ci-dessus. La méthode B semble dans ce cas la plus indiquée.

## 2.6. Coûts d'entretien dépendant du dimensionnement

### 2.6.1. Clé de répartition de ces coûts

Comme il a déjà été souligné, on entend ici par entretien, le seul entretien de dimensionnement, c'est-à-dire les coûts de reprofilage et de reconstruction, à l'exclusion de diverses autres espèces de coûts d'entretien.

L'essai AASHO permet d'interpréter plus exactement tout ceci. En effet, la notion de "durée de service de la chaussée" y est définie dans le passage consacré à la méthode de dimensionnement AASHO.

Par définition, la durée de service y est déterminée par le nombre n d'applications de la charge par roue B que peut subir un nouveau revêtement d'épaisseur D jusqu'à ce que soit atteint un indice de qualité déterminé p. La méthode de dimensionnement AASHO (D = fonction de n et P) se fonde donc entièrement sur ce concept de durée de service basé sur l'indice p. Cela représente donc une différence essentielle par rapport aux anciennes méthodes de dimensionnement qui ignoraient totalement un paramètre tel que p (cf. paragraphe 3). Comme il a déjà été indiqué, l'indice p = 1,5 mettait un point final aux essais AASHO.

La chaussée (souple) était alors reconstruite par application d'une nouvelle couche d'asphalte.

On a analysé alors le comportement de 99 sections d'essai différentes dans l'intention de trouver une nouvelle relation générale entre D, n, P et p, c'est-à-dire entre la régression de la valeur de p, après reconstruction, le nombre d'applications de charges n<sup>1</sup> après reconstruction, P et la nouvelle épaisseur D<sup>1</sup> =  $c^1 h^1 + c_1 h_1 + c_2 h_2 + c_3 h_3$ , formule dans laquelle c<sup>1</sup> et h<sup>1</sup> représentent la constante matériau et l'épaisseur de la nouvelle couche d'asphalte. Pour diverses raisons, il n'est cependant pas (encore) possible d'inférer une nouvelle "formule de

dimensionnement pour reconstruction" des données réunies. La raison principale de cette impossibilité semble être le fait qu'il n'a pas été possible de donner après la reconstruction (effectuée dans des conditions défavorables pendant l'essai AASHO) à  $p$  une valeur égale à celle des nouvelles chaussées. En outre,  $p$  s'avère différer en cas de reconstruction tandis que  $D^1$  après reconstruction (sur la base néanmoins de  $c^1 = c_1$ ) était en général si grand qu'on ne pouvait espérer atteindre un  $p$  peu élevé avant la fin de l'essai ( $n = 1,1 \cdot 10^6$ ). Les résultats moyens de cette "overlay-study" figurent dans le tableau A qui permet d'arriver à ces diverses conclusions ; le tableau B reproduit, à titre d'exemple de résultats distincts, toutes les sections reconstruites de la voie affectée aux véhicules de 6,8 tonnes de charge par roue. En conséquence, l'essai AASHO ne nous fournit pas de données détaillées sur  $c^1$ , indice de la valeur de reconstruction.

L'analyse de la reconstruction a été beaucoup plus limitée sur les pistes d'essai en béton.

Il convient de s'en souvenir quand on veut répartir les coûts d'entretien sur la base de formules AASHO.

On a néanmoins la possibilité de fonder les calculs sur les formules AASHO élaborés pour le "dimensionnement des nouvelles chaussées." On admet dans ce cas que les mêmes lois, par exemple l'équivalence de la charge par essieu (base  $P^4$ ), sont valables pour la reconstruction.

Le raisonnement est alors le suivant. L'ancienne chaussée doit être reconstruite quand  $p$  atteint une valeur déterminée (2,0 ou 2,5). La chaussée a alors subi un certain nombre d'applications de charges (exprimées en équivalent de 4 tonnes de charge par roue) correspondant à son indice d'épaisseur. Il importe peu de savoir si ce nombre correspond au nombre projeté, ou en d'autres termes si la durée de service réelle correspond à la "durée de service prévue".



En cas de reconstruction, on peut soit conserver les mêmes constantes matériau pour les couches originales de la chaussée restées intactes, soit les modifier (en les majorant pour tenir compte d'un accroissement de la compacité dû au trafic ou en les réduisant pour tenir compte d'une perte de cohésion) et on a pour le matériau utilisé pour la reconstruction une valeur pour  $c^1$  (par exemple  $c^1 = c_1$  selon l'hypothèse formulée dans les tableaux A et B); en cas de reconstruction, il est possible d'utiliser, ou de ne pas utiliser les couches existantes; il est toujours possible de calculer un nouvel indice d'épaisseur  $D^1 = \sum c_i h_i$ .

Si les formules AASHO sont exactes, l'épaisseur totale est  $D^1 = K \left[ \sum q_i(t) f_i(t) \right]^{1/6}$ , c'est-à-dire que cette épaisseur peut également être calculée sur la base de la structure prévue du trafic et de la durée de service souhaitée de la nouvelle chaussée. La clé de répartition des coûts peut donc se calculer par les méthodes exposées aux paragraphes 2.3, 2.4 et 2.5. Cela signifie donc que la clé de répartition des coûts d'un entretien consistant en une reconstruction est absolument identique à la clé de répartition valable pour la reconstruction de nouvelles chaussées.

Nous montrerons encore dans les paragraphes suivants que la répartition des coûts ne peut varier avec la valeur de l'ancienne chaussée, ce qui implique une répartition identique des coûts afférents soit à la reconstruction complète de la chaussée, soit à l'application d'une nouvelle couche destinée à prolonger la durée de service de la chaussée.

L'exemple concret suivant montrera que ce dernier cas peut également être déduit directement des graphiques de dimensionnement AASHO. Supposons qu'une ancienne chaussée ait été prévue (ou s'est avérée, en fin de compte, convenir uniquement) pour  $10^6$  applications de charges équivalentes à une charge de 4 tonnes par roue avant que  $p$  ne soit égal à 2,5. Il ressort du graphique que pour ce faire  $D_A$  doit être égal à 4,0. La durée de service exprimée en années s'est par exemple révélée être de 15 années. Comme on s'attend à un décuplement du nombre de charges de roues équivalentes à 4 tonnes pendant les 15 prochaines années pour

lesquelles la reconstruction a été effectuée,  $N^1$  devient égal à  $10^7$ , ce qui requiert  $D^1 = 5,5$  jusqu'à  $p = 2,5$ . Il faut donc répartir l'épaisseur de la couche reconstruite selon la même méthode que celle qui a été utilisée précédemment pour la répartition de l'épaisseur de la couche prévue  $D_A = 4,0$ ; en effet, il aurait été également possible de prendre  $D = 5,5$  dans le projet initial et d'adapter ainsi l'ancienne chaussée à  $N_{eq. 4 t} = 10^7$ , auquel cas cette couche aurait été répartie de la même façon (abstraction faite d'importantes modifications dans la répartition de  $q$ ).

L'(indice d') épaisseur de la couche reconstruite  $\Delta D$  qui a réellement été appliquée et qui doit être répartie entre les catégories de charges par roue ne présente aucun intérêt pour la clé de répartition à appliquer.

Si l'indice d'épaisseur  $D_A$  de l'ancienne chaussée a conservé sa valeur originale (c'est-à-dire si la somme de  $c_i h_i$  est restée identique, du fait par exemple que l'ensemble des différentes constantes matériau et des épaisseurs n'a pas subi de modification notable),  $\Delta D$  est égal à  $D^1 - D_A$ . Cela mérite une mention spéciale parce qu'il est utile de se rendre compte du fait qu'une chaussée reprofilée (à la fin de sa "durée de service" définie par un degré déterminé de qualité) peut avoir la même valeur structurelle qu'au début de sa durée de service. Cet objectif commande d'ailleurs le choix d'un niveau approprié de reconstruction : il doit être tel que la diminution de la qualité, au sens de diminution de l'indice original d'épaisseur de la chaussée, soit faible.

Les données figurant dans les tableaux A et B permettent d'affirmer que dans l'ensemble tel a été le cas pour les sections reconstruites de l'essai AASHO.

Un cas concret dans lequel  $\Delta D = D^1 - D_A$  ( $D^1$  = indice d'épaisseur prévu en cas de reconstruction et  $D_A$  = indice d'épaisseur original (prévu) en cas de construction nouvelle), est celui d'une chaussée souple dans laquelle le trafic accroît les valeurs de  $c$  de la couche de base en sable et de la couche de fondation par un compactage subséquent, allant de pair avec l'apparition de frayées et d'autres phénomènes, qui augmente la valeur  $D$  de la chaussée, mais réduit l'unité et, partant, l'indice de qualité  $p$ . Un grand nombre d'applications de charges fait apparaître dans l'asphalte des fissures locales qui se propagent rapidement. Ceci entraîne une diminution de la valeur moyenne de  $c$  de l'asphalte et de  $D$ .

Cette diminution de  $D$  par fissuration et apparition de frayées secondaires entraîne une diminution rapide de  $D$ . La reconstruction devra être effectuée à ce moment pour éviter que  $D$  n'ait atteint un niveau trop bas au moment de la reconstruction. Si  $D = D_A$ , la valeur de la chaussée est restée la même et la perte de la valeur ou l'"usure" au sens de dimensionnement est nulle.

Si l'on retarde trop la reconstruction, la valeur structurelle de la chaussée ( $D$  en cas de reconstruction) peut avoir diminué dans de fortes proportions ; dans le cas (exceptionnel) le plus grave,  $D$  est devenu égal à 0 et il faut construire une toute nouvelle chaussée.

Il ne fait aucun doute qu'il y a dans un tel cas "usure" manifeste de la chaussée. Il n'est donc pas étonnant que les coûts de reconstruction seront facilement considérés comme réparation de l'"usure" et qu'on les mette en rapport avec la formule d'équivalence de la charge par essieu déduite des résultats AASHO. Elle indique en effet que les diverses charges par essieu peuvent être pondérées de façon inversement proportionnelle à leur charge par roue à la quatrième puissance.

On a constaté (cf. 2.2.) qu'une chaussée d'épaisseur déterminée pouvait être parcourue, par exemple, par  $A$  charges par roue de 3 tonnes, mais aussi par  $\left(\frac{3}{0,5}\right)^4 = 1295$  charges par roue de 0,5 tonne avant

d'atteindre le même niveau de  $p$ . Nous avons montré au paragraphe 2.4. que pour une chaussée dont la moitié est prévue pour 1295 A charges par roue de 0,5 tonne et l'autre moitié pour A charges de 3 tonnes, on doit effectivement obtenir une répartition des coûts par application d'essieu de 1 : 1295 (clé A1), mais que des répartitions plus réalistes telles que 7A : 3A aboutissent à des résultats totalement différents si l'on prend l'épaisseur nécessaire de la chaussée comme critère des coûts.

C'est ainsi que si le trafic empruntant la route A se compose de  $10^6$  charges par roue de 0,5 tonne et le trafic empruntant la route B de  $10^6$  charges de 3 tonnes, les épaisseurs doivent être de  $D_A = 1,0$  et de  $D_B = 3,3$  (jusqu'à ce que  $p = 2,5$ ).

Pour la route C parcourue par un trafic hétérogène composé de  $10^6$  passages de 0,5 tonne et  $10^6$  charges par roue de 3 tonnes ( $q_1 = q_2 = 50\%$ ) l'épaisseur  $D_c$  doit également être de 3,3. Après  $10^6$  applications de charges, le niveau de  $p$  est égal à 2,5, ce qui signifie que les 3 routes ont atteint le même niveau d'aptitude au service nécessitant un reprofilage. La cause de ce reprofilage doit être imputée pour la route A aux charges par roue de 0,5 tonne, pour la route B aux charges par roue de 3 tonnes et pour la route C à l'ensemble des charges par roue de 0,5 tonne et de 3 tonnes. Cela n'a rien à voir avec le fait que l'épaisseur de la route C lui permettrait de supporter plus de  $10^9$  applications de charges de 0,5 tonne si elle n'était pas parcourue simultanément par des véhicules de 3 tonnes. D'après les méthodes B (ainsi que A1 et A2), les véhicules de 0,5 tonne n'ont en effet jamais payé plus que l'épaisseur qui leur était destinée (0,5 seulement pour la méthode B et 0,77 pour les méthodes A), l'épaisseur supplémentaire  $D_c - D_A = 2,3$  étant toujours, dans sa totalité, aménagée pour les véhicules de 3 tonnes. Quand la route est reconstruite pour supporter par exemple  $10^7$  applications de charges de 0,5 t, 3 t ou 0,5 t + 3 t, la nouvelle épaisseur requise  $D^1$  est égale à  $D_A^1 = 1,5$ ,  $D_B^1 = 4,9$  ou  $D_C^1 = 4,9$ .

Si  $D' = D^1 - D$ , les coûts pour  $\Delta D_A = 0,5$ ,  $\Delta D_B = 1,6$  et  $\Delta D_C = 1,6$  devront être répartis pour ces routes entre les catégories de charges par essieu. Avec la clé de répartition  $A_1$ , les coûts sont répartis pour la route C dans un rapport de 0,5 : 1,6, ou de 0,4 : 1,2, et avec la clé de répartition B dans le rapport de 1 : 5,6, c'est-à-dire dans le rapport de 0,5 à 1,35, de sorte que la route à trafic hétérogène présente plus d'avantages pour les deux catégories que les routes A et B. Ceci est donc le cas "souhaité" où la chaussée reconstruite n'a guère perdu sur le plan du dimensionnement.

Si les routes A, B et C avaient été utilisées jusqu'à ce que  $p \ll 1,5$  et qu'elles soient entièrement détruites, le fait aurait dû être imputé aux charges de 0,5 t pour la route A et aux charges de 3 t pour la route B ; pour la route C, on aurait pu constater que la destruction matérielle est causée principalement par les charges de 3 tonnes.

On montrera au paragraphe 2.6.2, que la part de chacun à la destruction physique de la chaussée est proportionnelle à  $P^x$ , valeur dans laquelle  $x = 4$  à 5. La contribution de la charge de 3 tonnes dans les coûts de reconstruction de la chaussée détruite devrait donc être 2000 fois plus forte environ que celle de la charge de 0,5 t. Si l'on prend de tels chiffres comme base, les coûts de la nouvelle chaussée devront être répartis comme suit : le rétablissement de la chaussée usagée à son niveau D original est imputé dans sa totalité aux charges de 3 tonnes et l'adjonction d'une épaisseur supérieure à D est répartie par exemple d'après la méthode B. Si l'on songe qu'on peut sans difficulté donner à p une valeur élevée en reconstruisant la chaussée originale jusqu'à  $D_c = 3,3$ , on pourrait donc répartir les coûts de la reconstruction proprement dite de la chaussée (qui redevient ainsi utilisable par une nouvelle série de  $10^6$  applications de 0,5 et de 3 tonnes) dans le rapport de 1 : 2.000. Si la chaussée avait été détruite au point que D avait diminué de moitié, cette répartition serait valable pour un  $1/2 D$ , etc. Il est toutefois évident que cette répartition ne doit pas, sans raison suffisante, être fonction du taux arbitraire de diminution de la valeur de la chaussée.

Il est intéressant d'examiner à ce propos comment se présente en pratique la situation dans la construction routière. Pour des routes nouvelles construites selon des conceptions modernes, il est tout à fait concevable que la diminution de la valeur soit lente au point de répondre au critère  $D$  avant reconstruction =  $D$  projetée. Sur de vieilles routes, il existe plusieurs circonstances dans lesquelles la valeur de la chaussée peut subir des diminutions brusques et notables. Cela peut se présenter notamment en cas de dégel superficiel, quand par suite d'une diminution saisonnière de  $D$ , des passages même peu nombreux d'essieux lourds peuvent provoquer des dégâts considérables, ou en cas d'alourdissement "par bond" du trafic (sur le plan de la charge par essieu ou de la fréquence) empruntant une route qui n'avait pas été dimensionnée à cet effet. L'indice d'épaisseur (temporairement) peu élevé du premier cas explique pourquoi ces chaussées ne peuvent supporter qu'un nombre beaucoup plus réduit d'applications de charges ( $D = a_2 n^{-1/6}$ ) et sont beaucoup plus sensibles à un nombre d'applications de charges, à tel point qu'un petit nombre de ces applications peut être fatal surtout si elles se situent immédiatement avant la fin de la durée de service (quand  $p$  est proche de 1,5 cf. nombre d'applications de charges faisant passer le niveau de  $p$  de 2,5 à 1,5 pour des valeurs croissantes de  $D$ ).

En principe, il est toutefois erroné de tenir compte de tels cas dans l'établissement d'une clé de répartition des coûts parce que :

- certaines catégories admises de charges par essieu ne peuvent être tenues pour responsables des conséquences de certaines mauvaises techniques de construction routière utilisées dans le passé ;
- certaines catégories déterminées de charges par essieu admises à circuler sur les routes considérées ne peuvent être tenues pour responsables de la non-adaptation de dimensionnement de ces routes aux charges par essieu et aux fréquences admises pendant une durée de service normale ;

- certaines catégories admises de charges par essieu ne peuvent être tenues pour responsables des détériorations considérables qu'elles occasionnent à une chaussée quand la reconstruction de cette dernière est retardée plus qu'il n'est raisonnable.

En conséquence, il faudra toujours appliquer la même clé de répartition pour les coûts d'entretien et de reconstruction.

### 2.6.2. Aspects physiques de la détérioration des chaussées

Comme nous l'avions exposé au paragraphe 2.1., la diminution de l'indice de qualité  $p$  est imputable surtout à l'apparition d'irrégularités (longitudinales), la fissuration ne jouant qu'un rôle secondaire. L'unité de la chaussée se détériore lentement par suite de l'augmentation du nombre d'applications de charges.

Pour les chaussées souples, la cause de cet état de fait doit être recherchée dans l'addition des parties non élastiques de la déflexion totale apparaissant sous le passage des roues qui soumet notamment les diverses couches à un nouveau compactage.

Des différences locales dans la force portante ou la compacité longitudinale sont à l'origine des différences qu'accuse la déformation plastique et le compactage longitudinal, tandis qu'un certain nombre de frayées peuvent évidemment apparaître sous le passage des roues. L'apparition de ces frayées surtout est fonction du dimensionnement de la chaussée. La déformation élastique ainsi que la déformation plastique, plus importante dans le cadre de cette étude, la surface de la chaussée se calcule en principe comme étant l'étirement élastique vertical permanent intégré sur toute l'épaisseur de la chaussée provoqué par la charge par roue. La déformation plastique croît avec la charge par roue, mais dépend surtout de la visco-élasticité des matériaux constituant la chaussée (cette visco-élasticité est beaucoup plus grande en été pour l'asphalte et dépend de la teneur en eau pour les matériaux non liés). Tout ceci est encore insuffisamment connu pour être quantifié.

La diminution rapide de la valeur de  $p$  de la chaussée qui s'est manifestée sur les sections AASHO vers la fin de la durée de service en allant de pair avec une fissuration étendue de l'asphalte aux lieux de passage des roues ainsi qu'avec des frayées, peut être imputée au dépassement d'une valeur limite critique dans l'étirement vertical du sous-sol  $\left\{ \begin{array}{l} \text{ainsi que dans l'étirement radial à la face inférieure de} \\ \text{l'asphalte} \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} \varepsilon_r \\ \varepsilon_r \end{array} \right. \text{ (rupture de fatigue).}$

Si, dans des essais de fatigue effectués sur des barres d'asphalte on donne l'étirement admissible comme fonction du nombre d'applications de charges <sup>(1)</sup> on obtient  $\varepsilon_r = c \cdot n^{-1/5}$  à  $-1/6$ .

La relation est similaire quand on donne l'étirement  $\varepsilon_v$  de la face inférieure de diverses constructions AASHO parcourues par des essieux de charges diverses, comme fonction du nombre d'applications de charge jusqu'à ce que  $p = 2,5$  <sup>(2)</sup> :  $\varepsilon_v = c' \cdot n^{-1/5}$  (cf. figure 4).

---

(1) P.S. Pell, "Fatigue characteristics of bitumen and bituminous mixes", Proc. Int. Conf. on the Struc. Design of Asph. Pav., Ann Arbor 1962, 310.

(2) G.M. Dormon, The extension to practice of a fundamental procedure for the design of flexible pavements. Proc. Int. Conf., on the Struct. Design of Asph. Pav., Ann Arbor 1962, 785.



Sur un certain nombre de sections d'essai rigides de l'"AASHO Road Test", on a mesuré l'étirement au bord des dalles de béton et trouvé comme moyenne de quelques catégories de sections d'essai, une relation comparable entre cet étirement et le nombre admissible d'applications de charges  $n$  jusqu'à ce que  $p = 2,5$ , c'est-à-dire  $\epsilon = c.n^{-4,66}$  (cf. note \*).

(\*) Dans les diagrammes de fatigue, la tension ou l'étirement maximum admissible est indiqué comme fonction du nombre d'applications de charges. Quand ce dernier augmente, l'étirement admissible diminue. A l'échelle logarithmique, ces diagrammes donnent en général une droite d'un angle de

8 à 12°, ce qui représente un rapport  $\sigma(\epsilon) = c.n^{1/5}$  à  $1/6$ .

Quand le nombre d'applications de charges est très élevé, cette droite est horizontale pour de nombreux matériaux, ce qui donne une valeur limite de l'étirement admissible qui ne diminuera plus quand augmentera le nombre d'applications de charges. Si les tensions sont toujours maintenues à un niveau inférieur à celui de la "tension alternante" qui provoque cet étirement maximum admissible, il ne pourra jamais y avoir de rupture de fatigue.

Si tel était également le cas dans la construction routière et si c'était là le seul facteur déterminant la dégradation de la chaussée, les courbes  $D =$  fonction de  $n$  dans les graphiques de dimensionnement tendraient, pour des valeurs élevées de  $n$  à prendre la forme d'une asymptote horizontale.

Dans les graphiques AASHO (fig. 1), on n'a pas pu le trouver dans la zone représentant les essais réels mais il aurait sans aucun doute été possible d'y arriver si ceux-ci s'étaient étendus sur une période plus longue ( $n$  plus élevé). La partie extrapolée des courbes est donc totalement hypothétique.

Ces relations peuvent être mises en parallèle avec la "formule de dimensionnement" et la formule d'équivalence de charge par essieu sur la base de  $P^4$ . Pour ce faire, il faut songer que l'étirement  $\epsilon_v$  est (très globalement) inversement proportionnel à l'épaisseur de la chaussée (pour un rapport donné des modules d'élasticité une structure unique des charges), ce qui rend admissible une correspondance avec la forme la plus simple de la formule de dimensionnement AASHO :  $D = a_2 n^{1/6}$ .

Il est également remarquable que les lignes représentant diverses charges par roue se confondent dans le graphique  $\epsilon_v - n$ , ce qui montre qu'on obtient un équivalent incorporé de la charge par essieu sur la base de l'étirement. Sur une épaisseur égale  $D_A$ , une charge par roue de 3 t exerce sur les fondations une pression  $p_v$  dans l'ensemble 5 fois aussi forte et provoque un étirement  $\epsilon_v$  5 fois aussi grand (les calculs étant effectués sur des constructions de nature semblable et présentant notamment le même rapport entre les modules d'élasticité sous une charge statique). On peut déduire du graphique qu'un étirement cinq fois aussi long peut représenter dans de tels diagrammes de fatigue un facteur 3000 dans le nombre admissible d'applications de charges.

La charge par roue de 3 t contribue à la destruction de l'épaisseur  $D$ , quand cette destruction est effectuée (et peut être censée latente quand elle n'est pas effectuée et que la chaussée n'est pas encore renforcée) par un "facteur de détérioration potentielle" 3000 fois plus grand que la charge de 0,5 t. Ce facteur se situe entre les rapports  $P^4$  et  $P^5$ .

C'est une conclusion à laquelle on peut également arriver de la façon suivante (cf. renv. 1).

---

(1) W. Heukelom et A.J.G. Klomp, Road design and dynamic loading. Assoc. Asph. Paving Technologists 33, 92, (1964).

Sur la base de la théorie de l'élasticité (pour une charge statique),  $\frac{\epsilon_v}{\sigma_0} = \frac{\xi E}{\sigma_0}$  est une fonction de divers paramètres

$\frac{h}{a}$  et  $\frac{E_n}{E_{n+1}}$  ( $h$  = épaisseur de couches,  $\sigma_0$  = tension de contact,

$a$  = rayon de la surface du pneu en contact avec la route et  $E$  = modules d'élasticité des couches), mais dans l'ensemble (quand les autres paramètres ne se modifient pas) est proportionnel à  $\sigma_0$  et à  $a^{3/2}$  etc.

puisque  $a$  est proportionnel à  $\sqrt{\frac{P}{\sigma_0}}$ ,  $\sigma_v$  et  $\epsilon_v$  est proportionnel à  $\sigma_0^{-1/4} \cdot P^{3/4}$ .

La relation :  $n$  proportionnel à  $\sigma_v^{-5}$  devient donc :  $n$  proportionnel à  $\sigma_0^{-5/4} \cdot P^{-15/4}$ , (\*) ce qui donne également une bonne interprétation de la formule de l'équivalence de la charge par essieu  $n =$  constante  $\times P^{-4}$ . Le facteur supplémentaire dans le diagramme de fatigue est donc probablement causé par la différence dans la pression des pneus dont la plupart étaient cependant gonflés à la même pression dans l'essai AASHO (5kg/cm<sup>2</sup> environ) si l'on fait exception de la catégorie la plus légère (2kg/cm<sup>2</sup>).

Toutefois, si l'on n'avait pas choisi pour les deux différentes charges par roue la même épaisseur  $D_A$ , mais une épaisseur  $D_B$  3,3 fois plus épaisse que la charge lourde, l'étirement provoqué par la roue de 3 t serait 5 fois moins grand sur  $D_B$  que sur  $D_A$  et l'étirement de  $D_B$  est égal à celui que provoque la roue de 0,5 t sur  $D_A$ . Le nombre admissible de passages de roue de 3 t sur  $D_B$  est à son tour multiplié par 3000 et la durée de vie est égale à celle de  $D_A$  avec des roues de 0,5 t.

---

(\*) Les formules de dimensionnement et les clés de répartition peuvent, le cas échéant, être corrigées sur cette base en remplaçant  $P^4$  par  $\sigma_0^{5/4} \cdot P^4$ .

Ces chaussées, équivalentes par le nombre admissible d'applications de charges ( $D_A$  pour 0,5 t et  $D_B$  pour 3 t) se comporteront de façon absolument identique, indépendamment des détériorations qu'elles pourraient subir.

Si l'épaisseur  $D_0$  ( $=D_B$ ) supporte un trafic hétérogène composé de 50% de charges de 0,5 t et de 50% de charges de 3 t ( $q_1 = q_2$ ), ces deux catégories de charges contribuent potentiellement aux dégâts éventuels dans le rapport de 1 à 3000. Les dégâts seront provoqués après l'atteinte du nombre admissible d'applications de charges équivalentes calculées sur cette base. En fait, les dégâts éventuels seront provoqués ici par une charge par roue de 3 t (ce n'est que dans le cas où  $q_1 : q_2 = 1 : 3000$  qu'il y a 50% de chances que l'ensemble des charges par roue de 0,5 t cause des fissurations). Le dimensionnement était cependant conçu pour une durée de service souhaitée appropriée à la structure donnée du trafic. Si aucun autre facteur n'avait conditionné le choix d'une durée de service déterminée, on aurait pu projeter une durée de service plus longue et lui donner même une longueur qui aurait évité l'apparition de détériorations notables dues à la circulation et, partant des coûts de reconstruction ou de reprofilage. Toutefois, la durée de service d'une chaussée est toujours choisie assez brève, 20 ans par exemple. Cette modestie a plusieurs causes qui relèvent de la circulation (après cette période, la route est probablement vieille sur le plan de la circulation et aurait besoin d'être reconstruite) ou de la technique (un reprofilage, impliquant un renforcement simultané de la route, devra de toute façon être exécuté après quelque temps pour réparer soit un tassement prévisible du sous-sol, même sans trafic, soit l'usure ou le glaçage du revêtement).

Une autre raison, d'importance non négligeable, de la brièveté de cette durée de service est qu'à l'encontre des espérances, certains matériaux et techniques accusent ultérieurement des insuffisances occasionnant des coûts supplémentaires de "reconstruction".

Sur la base de ces arguments, il semble donc juste de traiter les coûts de reconstruction de la même façon que les coûts de construction.

L'aspect physique de la diminution de l'aptitude au service ou de la qualité de la route normale peut donc amener à découvrir les responsables de cette diminution de l'aptitude au service ou de la qualité (exprimée par  $p$  ou  $D$ ). Si l'on admet que le comportement physique de la chaussée sous un trafic hétérogène peut également être interprété de la façon décrite ci-dessus (ce qui n'est d'ailleurs pas prouvé), les chances qu'une catégorie déterminée de charges par roue doive en être tenue pour responsable sont dans le rapport de  $q_1 \xi_1 : q_2 \xi_2 : \text{etc.}$ , ce qui peut être rendu, si l'on se base sur ce qui précède, par  $q_1 P_1^{4 \text{ à } 5} : q_2 P_2^{4 \text{ à } 5} : \text{etc.}$  Cela amène donc à appliquer la clé  $P^4$  par application de charge, mais uniquement pour la réparation de la diminution effective de  $p$  ou des dégâts occasionnés (amincissement de  $D$ ).

Comme il a été exposé au paragraphe 2.6.1, les détériorations doivent toujours être évitées dans toute la mesure du possible et la quantité de matériaux théoriquement nécessaires à l'amélioration de l'uni (valeur de  $p$ ) est minime si le niveau de reconstruction est bien choisi; une épaisseur minimale est néanmoins nécessaire dans la pratique.

Comme on voudra cependant, en règle générale, donner à une route reconstruite une nouvelle durée de service (de 20 ans environ), le redimensionnement, qui permet en même temps d'améliorer l'uni, joue le rôle principal.

Dans l'appréciation de ces considérations relatives à l'aspect physique de l'entretien des chaussées, il convient d'être attentif au fait que les certitudes ne sont pas encore nombreuses dans ce domaine et que diverses déclarations ne doivent être considérées que comme tentatives d'interprétation.

Nombreuses sont évidemment les vieilles routes dont on ne connaît absolument pas le mode de construction et, bien moins encore, les étirements et les caractéristiques de fatigue. Ces routes sont souvent très insuffisamment adaptées à la circulation actuelle. La cause incombe souvent aux insuffisances notoires du sous-sol qui sont entièrement corrigées dans les constructions nouvelles. Toutefois, une amélioration fonctionnelle est souvent irréalisable pour diverses raisons (trafic, coûts), avec cette conséquence que les "coûts d'entretien" sont élevés (les moyens servant à l'entretien de la chaussée étant souvent inadéquats). Comme exemples concrets, on peut citer les routes traversant les sols tourbeux et subissant des dégâts considérables dus au dégel superficiel. Dans le premier cas, la dégradation de la chaussée est continue, même sans trafic, tandis que les dégâts sont périodiques dans le deuxième cas. Dans les deux cas, l'application des résultats AASHO ou de leur interprétation sur la base des caractéristiques de fatigue doit être considérée comme très sujette à caution.

D'autres analyses effectuées sur des routes expérimentales ainsi que sur divers matériaux utilisés en construction routière ont également montré que, en cas d'augmentation du nombre d'applications de charges, le comportement de la chaussée peut être extrêmement divergent et difficile à analyser.

Il semble donc provisoirement impossible de mettre au point une méthode de répartition des coûts d'entretien valable dans tous les cas. Cette impossibilité est plus marquée encore que pour les coûts afférents à la construction d'une route nouvelle.

Au cas, par exemple, où les offres seraient dans l'ensemble moins élevées pour la construction d'une chaussée plus épaisse, la répartition des coûts de cette chaussée ne doit pas se fonder sur les dépenses d'entretien et de renouvellement de la chaussée existante ainsi que sur l'intérêt et l'amortissement éventuel des fonds investis, et sur l'intérêt, l'amortissement et les coûts d'entretien d'une chaussée dotée de dimensions optimales.

La solution qui semble donc s'imposer est de fonder la méthode entièrement sur une construction moderne "optimale". Comme pour les coûts de construction d'une chaussée nouvelle, il semble opportun dans ce cas de se fonder sur la construction "standard" exécutée sur la base de la répartition prévue P-q pour une durée déterminée après laquelle un reprofilage prolongera la durée de service d'une durée égale.

Toutefois, on en revient ainsi aux clés de répartition données au paragraphe 2.3.

Il convient de souligner enfin, que les coûts de diverses espèces d'entretien doivent évidemment être répartis de façon totalement différente entre les diverses catégories de charge par essieu. On peut distinguer à cet effet entre une répartition simple par application de charges (clé de répartition n) et une forme corrigée de cette répartition qui tiennent compte de la superficie différente de la route O occupée par les diverses catégories (clé de répartition O,n).

Les résultats de l'essai AASHO ne peuvent être utilisés que pour un seul groupe de coûts appartenant à cette grande catégorie qu'il convient de ventiler d'une autre façon. Il s'agit en l'occurrence des coûts d'amélioration de la rugosité de la chaussée. Au cours des essais AASHO, on a en effet effectué périodiquement de nombreuses mesures de cette rugosité et étudié l'incidence de P et de n sur ce coefficient de frottement. Nous ne nous étendrons cependant pas sur ce point dans le présent rapport.

N.B.:

Il arrive qu'on justifie l'application de la clé  $P^4$  de répartition des coûts d'entretien par l'argument suivant. Supposons que l'on remplace par des charges de 3 tonnes toutes les charges par roue passant sur une chaussée de  $D = 1,0$  capable de supporter  $10^6$  charges par essieu de 0,5 tonne jusqu'à ce que  $p = 2,5$  d'après le graphique AASHO, cette chaussée

aurait atteint le niveau  $p = 2,5$  après  $\frac{1}{1295} \cdot 10^6$  applications de charges, c'est-à-dire après 1000 passages environ. Cela signifierait que la durée de service ne serait pas de 10 ans environ à raison de 27 véhicules par jour, mais de 3 jours (jusqu'à  $p = 2,5$ ). La durée de service (jusqu'à  $p = 2,5$ ) est donc réduite d'un facteur  $\left(\frac{3}{9,5}\right)^4 = 1295$ , de sorte que pour l'entretien, le rapport entre les coûts est également de 1 : 1295 ; en effet, les coûts d'entretien sont proportionnels à la durée de service. L'exemple est indubitablement exact et il faudrait donc faire face à des coûts élevés si la chaussée qui, après avoir vu tomber en quelques jours son indice de qualité à  $p = 2,5$ , serait en quelques jours supplémentaires détruite de fond en comble, et devrait à chaque fois être reconstruite pour que  $D = 1,0$ . Il est évident que cette façon de faire serait techniquement et économiquement injustifiable parce qu'on pourrait construire, pour un coût 3,3 fois plus élevé, une chaussée de  $D = 3,3$  capable de supporter  $10^6$  charges par essieu (pendant les 10 années de service) avant que son indice de qualité  $p$  ne tombe à 2,5/.

L'analogie avec les diagrammes de fatigue est ici tout à fait de circonstance : une fine barre métallique présentant un diagramme de fatigue correspondant se briserait sous une charge faible ( $\xi = 10^{-4}$ ), après  $6 \cdot 10^6$  alternances ; la rupture interviendrait déjà après  $2 \cdot 10^3$  alternances avec une charge élevée provoquant un étirement 5 fois plus grand ( $5 \cdot 10^{-4}$ ). Les coûts seraient ainsi multipliés par 3000 si l'on continuait de la sorte. On peut cependant prendre une barre plus lourde (4 fois plus chère par exemple) et ramener ainsi l'étirement à  $10^{-4}$ . Dans ce cas, les coûts intervenant pendant la période couverte par les  $6 \cdot 10^6$  alternances ne seraient alors que quadruplés. Si l'on alternait les charges faibles et les charges importantes, la barre se briserait également après  $2 \cdot 10^3$  charges importantes et la rupture pourra être imputée à un grand étirement.



Toutefois, si l'on prévoit une durée de service très longue, la rupture n'interviendra qu'à long terme. Etant donné que la forte épaisseur (et les coûts élevés) que cela implique peuvent être anti-économiques pour d'autres raisons, le choix de la durée de service est cependant dicté par d'autres considérations. Dans la plupart des cas, on pourra cependant prévenir toute rupture de fatigue en ne dépassant pas la résistance aux tensions alternantes.

Si les coûts des dégâts occasionnés sont répartis en proportion du potentiel de détérioration au sens physique, une "bonne" formule de fatigue (coefficient élevé  $x$  dans le rapport  $\{ = c n^{-1x}$ ) aboutit à une clé de répartition élevée par application de charge pour la catégorie la plus lourde ; elle est d'environ

$1 : \frac{P_2}{2_1}^{x-1}$ . Ce résultat peu acceptable aurait également été obtenu

avec des graphiques AASHO modifiés (cf. note  $\alpha$ /page 43). Il pourrait être exprimé de façon exacte dans des formules de dimensionnement par le biais du concept d'équivalence de la charge par essieu. C'est, en outre, un argument supplémentaire poussant à considérer l'"entretien" aussi bien que le "redimensionnement" sur la même base que la construction de chaussées nouvelles.

### 3. Mesures de déflexion

Dans l'essai AASHO, la déflexion a souvent été mesurée par la poutre Benkelman. On recherchait un lien entre la déflexion mesurée et le dimensionnement (pour les mesures sous charges par essieu diverses). Les relations furent basées sur des mesures effectuées sur toutes les pistes d'essai avec essieu simple, à l'exception du plus léger (0,9 t), à l'automne de 1958, peu avant le début de la circulation, et au printemps de 1959, après que le sol eut été dégelé. Ces saisons ont été choisies intentionnellement parce que c'est en automne que de nombreuses routes sont ouvertes à la circulation et qu'elles sont en mauvaise condition au printemps.

Sur la base d'un modèle mathématique, nous avons encore obtenu ici un indice d'épaisseur (pour déflexions), de sorte que la chaussée pouvait être désignée par un seul chiffre, et que l'on pouvait déterminer l'équivalence d'épaisseur (uniquement pour la déflexion) entre les trois couches (asphalte, couche de base, couche de fondation en sable). Dans ce dernier cas, on a cependant négligé les résultats pour 2,7 tonnes, parce qu'ils présentaient de trop grandes différences avec le modèle général.

On a obtenu les relations suivantes entre les déflexions (d), mesurées sous une charge par roue P et les indices d'épaisseur (D) (nécessaires pour ces déflexions) qui s'y rapportent.

Déflexion totale en automne :

$$\log d_{fn} = 2,533 + 1,13 \log 2P - 3,61 \log (D_{fn} + 1) \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{et } D_{fn} = 0,0193 h_1 + 0,0055 h_2 + 0,0091 h_3 \dots \dots \dots (2)$$

Déflexion élastique en automne :

$$\log d_{fr} = 2,539 + 1,09 \log 2P - 3,32 \log (D_{fr} + 1) \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{et } D_{fr} = 0,0220 h_1 + 0,0063 h_2 + 0,010 h_3 \dots \dots \dots (4)$$

Déflexion totale au printemps :

$$\log d_{sn} = 2,976 + 1,46 \log 2P - 4,42 \log (D_{sn} + 1) \dots \dots \dots (5)$$

$$\text{et } D_{sn} = 0,0492 h_1 + 0,0079 h_2 + 0,011 h_3 \dots \dots \dots (6)$$

Déflexion élastique au printemps :

$$\log d_{sr} = 2,994 + 1,54 \log 2P - 4,60 \log (D_{sr} + 1) \dots \dots \dots (7)$$

$$\text{et } D_{sr} = 0,0552 h_1 + 0,0083 h_2 + 0,0122 h_3 \dots \dots \dots (8)$$

Dans ces formules, les déflexions  $d$  sont exprimées en microns, les charges par roue  $P$  en tonnes et les épaisseurs de couche  $h$  en centimètres. Les coefficients de relations pour  $D$  sont les coefficients de déflexion des trois couches.

La fig. 7 donne la courbe des déflexions totales pour les cinq charges par essieu incorporées dans les calculs. Les différences entre déflexions totales et élastiques sont très faibles.

Pour donner une idée de la précision de ces formules, signalons que 90% des déflexions mesurées au printemps se trouvent entre 0,72 et 1,38 fois les déflexions calculées suivant la formule. Les épaisseurs équivalentes à déduire des formules pour  $D_{fr}$  et  $D_{sr}$  pour les trois matériaux, appliquées dans ces pistes d'essai AASHO figurent dans le tableau suivant sur la base de l'épaisseur de la couche de base = 1.

Les équivalences d'épaisseur trouvées en analysant les résultats AASHO (équivalences de dimensionnement) leur sont comparées.

	rapport d'épaisseur			température surface route
	couche de base	béton d'asphalte	lit gravier- sable	
Déflexion élastique automne	1,0	3,5	1,6	21°C
Déflexion élastique printemps	1,0	6,7	1,5	15°C
Dimensionnement	1,0	3,15	0,78	-

Les différences entre le printemps et l'automne peuvent être attribuées à la température inférieure de l'asphalte au printemps et sans doute aussi à une diminution de la force portante de la couche de base après la période de gel. Comme on s'y attendait, la déflexion

du printemps correspond mieux aux projets de paramètres de la chaussée et de la charge par essieu par de meilleures corrélations dans le modèle mathématique comparé aux déflexions d'automne.

Bien que les équivalences d'épaisseur pour déflexions ne soient pas (ne peuvent pas être) les mêmes que les équivalences d'épaisseur de dimensionnement, la tendance est quand même identique. Les relations découvertes donnent l'occasion de déterminer les coefficients de déflexion pour divers autres matériaux dans la pratique. Au reste, le rapport AASHO affirme également que cette étude de déflexion doit contribuer à déterminer la valeur des routes existantes.

Si par exemple on mesure toujours les déflexions Benkelman sous roues jumelées de 4 tonnes, les formules AASHO sont pour le printemps

$$\log d_{sn} = 4,30 - 4,42 \log (D_{sn} + 1) \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{et } \log d_{sr} = 4,38 - 4,6 \log (D_{sr} + 1) \dots\dots\dots (10)$$

On peut examiner à présent si, pour les constructions "comparables" à l'essai AASHO, la relation est la même si on fait varier  $D_{sn} = \sum c_i h_i$ . Si ces relations AASHO s'avèrent valables dans l'ensemble pour certaines chaussées, on peut déterminer  $c'$  en utilisant des couches  $h'$  à constante matériau  $c'$ . Si, sur une chaussée dont l'indice d'épaisseur de déflexion est  $D_{sn}$  on pose une couche d'une épaisseur  $h'$  et d'une constante matériau  $c'$ , la déflexion (sous une roue de 4 t) est :

$$\log d'_{sn} = 4,30 - 4,42 \log (D_{sn} + 1 + c'h')$$

$$\log \frac{d_{sn}}{d'_{sn}} = 4,42 \log \left( \frac{c'h'}{D_{sn} + 1} + 1 \right), \text{ ce qui, lorsque}$$

$$\frac{c'h'}{D_{sn} + 1} \ll 1 \text{ donne } \log \frac{d_{sn}}{d'_{sn}} = \text{constante} \times h' \dots\dots\dots (11)$$

En effet, cette relation se rencontre souvent dans les mesures de déflexion et, si l'on considère les conditions données, cette formule donnée dans le rapport apparaît utilisable.

Lasalle (\*) tire encore une autre relation (plus complète) des résultats AASHO; elle peut être en bref rendue comme suit. Pour une couche supplémentaire h' du même matériau, dont la déflexion est d''<sub>sn</sub>, on obtient :

$$\log \frac{d_{sn}}{d''_{sn}} = 4,42 \log \left( \frac{d' h''}{D_{sn} + 1} + 1 \right)$$

et comme  $\frac{\log(1+A\epsilon)}{\log(1+\epsilon)} \approx A$  si  $A \ll 1$  et  $\epsilon \ll 1$

$$\log \frac{d_{sn}}{d'_{sn}} = \frac{h'}{h''} \log \frac{d_{sn}}{d''_{sn}} \dots \dots \dots (12)$$

Il en va naturellement de même pour d<sub>sr</sub>, d<sub>fr</sub> et d<sub>fn</sub>.

Ces formules peuvent être utilisées comme suit : si, pour une route (dont on ne connaît rien par ailleurs), on veut ramener la déflexion d<sub>sn</sub> à d''<sub>sn</sub> par une couche supplémentaire h'', il suffit d'appliquer une couche h' et de mesurer d', après quoi on peut donc calculer l'épaisseur exigée h''.

Etant donné la fiabilité plus grande, cette formule (12) dérivée des résultats AASHO est préférable à la formule (11).

La principale étude de déflexion sur les pistes d'essai AASHO visait à trouver une relation entre la déflexion (mesurée sous charge par roue P) et la durée de vie de la chaussée exprimée comme le nombre d'applications de charges admissibles n de la charge par essieu 2P. On

-----  
(\*) L. Lasalle et G. Langumier (Soc. Routière Colas). Considérations sur le calcul du renforcement des chaussées souples. Revue Générale des Routes, 386, 121-8 et 392, 115-27 (1964).

posait que la déflexion serait un critère utilisable pour la force portante de toute la construction de la chaussée, de la même façon que pour l'indice d'épaisseur, mais en même temps que la nature du sous-sol. Cela doit naturellement être vérifié de façon approfondie. Ici également, le comportement différent au printemps et en automne est déterminant au premier chef, de sorte que les mesures de déflexion doivent être traitées séparément.

A l'aide de la formule générale suivante, il a paru possible d'exprimer la relation entre d, P, n et p :

$$n_p = \frac{AP^B}{d^C}$$

Dans cette formule,  $n_p$  est le nombre d'applications

de charges avec charge par essieu 2 P que la chaussée a subies au moment où l'indice de qualité p est tombé à une certaine valeur. La déflexion d a été mesurée pour les diverses charges par roue P, qui correspondent aux charges par essieu de 2,7 , 5,4 , 8,2 , 10,2 et 13,6 tonnes utilisées lors de l'essai.

Pour les niveaux p 2,5 et 1,5, les formules suivantes sont calculées sur la base de ces mesures de déflexion effectuées en automne 1958 et au printemps 1959 :

Déflexion totale en automne :

$$\log n_{2,5} = 12,88 + 1,72 \log 2P - 3,07 \log d_{fn} \dots\dots\dots (13)$$

$$\log n_{1,5} = 13,74 + 1,76 \log 2P - 3,32 \log d_{fn} \dots\dots\dots (14)$$

Déflexion totale au printemps :

$$\log n_{2,5} = 14,41 + 1,32 \log 2P - 3,25 \log d_{sn} \dots\dots\dots (15)$$

$$\log n_{1,5} = 15,76 + 1,36 \log 2P - 3,65 \log d_{sn} \dots\dots\dots (16)$$

./.

La figure 8 donne le graphique de ces formules pour les 5 charges par essieu. On voit par exemple que la déflexion Benkelman pour une charge par roue de 4 tonnes en automne doit être de 560  $\mu$ m maximum et au printemps de 900  $\mu$ m maximum pour que, après  $10^6$  applications de charge, la chaussée ait encore un indice d'aptitude au service  $p \geq 2,5$ . Pour un indice d'aptitude 1,5 après  $10^6$  applications de charge cette déflexion maximum est respectivement de 640 et 1030  $\mu$ m.

Sur la base des limites de confiance calculées pour une certitude de 90%, on obtient assez de courbes sûres en déplaçant proportionnellement les courbes à la verticale sur une demi-partie d'échelle ou en remontant l'échelle verticale de  $\log n$  à  $\log (n-0,5)$ . Les déflexions maximales données comme exemples pour  $10^6$  applications de charge doivent alors être abaissées proportionnellement de 30%.

La meilleure correspondance entre les déflexions mesurées et les déflexions déterminées d'après la formule a été trouvée dans les mesures du printemps pour le niveau  $p = 2,5$ .

La fiabilité de ces relations ( $m =$  fonction de  $d$  et  $P$ ) est telle que, pour les conditions de l'essai AASHO, il est possible de calculer la durée de vie de la chaussée ( $n$  nombre admissible d'applications de charge) avec la même précision qu'à l'aide des relations basées sur l'indice d'épaisseur ( $n =$  fonction de  $D$  et  $P$ ).

Dans le rapport AASHO, ces relations sont déjà recommandées pour être utilisées dans la pratique de la construction des routes parce que l'on suppose qu'il pourrait être tenu compte, dans les déflexions, des différences existant dans un cas déterminé entre le sous-col et la construction et les conditions AASHO. Les différences réciproques de force portante dans la construction normale peuvent également être examinées sur la base de mesures de déflexion et incorporées dans les calculs.

La déflexion d'une chaussée quelconque peut ainsi devenir, peut-être, un meilleur critère d'aptitude à supporter un trafic déterminé que l'indice d'épaisseur qu'il est parfois difficile de déterminer dans le cas de chaussées vieilles.

Les essieux tandem et la catégorie la plus légère (P = 0,45 tonne) ne figurent nullement dans ces relations de déflexion. Il faut pour cela se reporter aux "relations de dimensionnement".

Si les mesures de déflexion sont effectuées sous une charge par roue de 4 tonnes au printemps et si l'on admet que ces relations de déflexion de l'essai AASHO sont également valables pour la chaussée en question, le nombre admissible n de charges par essieu de 4 tonnes pendant la durée de vie totale de la route (jusqu'à p = 2,5), est :

$$\log n_{2,5, eq4t} = 15,6 - 3,25 \log d_{sn, 4t} \dots\dots\dots (17)$$

Conformément aux suggestions formulées dans le rapport AASHO, Lasalle a élaboré au moyen de ces éléments une méthode complète de dimensionnement pour reconstruction (la méthode expérimentale Colas).

L'épaisseur de reconstruction souhaitée est calculée par la formule (12), à laquelle est incorporé un facteur de sécurité grâce aux déviations types calculées pour les déflexions Benkelman mesurées (sous 6,5 tonnes de charge par roue). Le niveau de déflexion désiré  $d''_{sr}$  est calculé à l'aide du nombre total d'équivalents de 6,5 tonnes auxquels on s'attend pendant une durée de vie souhaitée et obtenu par le moyen d'équivalences de charges par essieu AASHO ( $P^4$ ).

Pour les relations entre  $n_{eq6,5t}$  et  $d_{sn6,5t}$ , on applique la formule (15).



On semble donc poser qu'une reconstruction peut être conçue comme un redimensionnement en vue de prolonger la durée de vie et non comme la répartition (partielle) d'une destruction. Cela semble raisonnable, du fait que l'on considère la route comme ayant une valeur de  $p \gg 2,5$ .

On peut à présent se demander s'il est possible de calculer une clé de répartition des coûts pour charges par essieu au moyen de la méthode de reprofilage proposée par Lasalle.

On pourrait procéder comme suit :

Si l'on applique la charge par essieu de 4 tonnes comme charge par roue équivalente et si l'on prend comme critère les déflexions sous cette charge par roue, la formule (17) donne la relation entre la durée de vie (nombre admissible d'applications de charge  $N$  équivalent à 4 tonnes) et déflexion.

Pour une chaussée quelconque, on mesure donc :  $\log N = 15,6 - 3,25 \log d$ .

On reconstruit la route au moment où on désire, pour le trafic mixte après reconstruction, une durée de vie telle que  $n'_1, n'_2$ , etc. applications de charge par roue  $P_1, P_2$ , etc. peuvent être admises.

On peut calculer le nombre d'applications équivalent à 4 tonnes comme  $N'_1 = n'_1 f_1, N'_2 = n'_2 f_1$ , etc. dans lesquelles on prend pour  $f_1$  et  $f_2$  par exemple les facteurs d'équivalence suivant la méthode de dimensionnement AASHO ou (ce qui est plus exact) des facteurs d'équivalence pour déflexions pouvant être déduits des résultats AASHO (voir ci-après).

Si l'on ajoute à la circulation la première catégorie de charges par roue, la seconde catégorie, etc. :

$\log (N+N'_1) = \log (N+n'_1 f_1) = 15,6-3,25 \log d'_1$   
 $\log (N+N'_2) = \log (N+n'_2 f_2) = 15,6-3,25 \log d'_2$  etc. et après addition  
 de la circulation mixte totale, la relation :  
 $\log (N+N'_1+N'_2+\dots+N'_n) = 15,6-3,25 \log d'_{1,2,\dots,n}$

A l'aide de la relation (12), on peut calculer les épaisseurs nécessaires pour ces additions comme :

$$\begin{aligned}
 h_1, h_2 \dots : h_n &= \log \frac{d}{d'_1} : \log \frac{d}{d'_2} : \dots \log \frac{d}{d'_n} = \\
 &= \left[ \frac{15,6-\log N}{3,25} - \frac{15,6-\log(N+N'_1)}{3,25} : \left( \frac{15,6-\log N}{3,25} - \frac{15,6-\log(N+N'_2)}{3,25} \right) : \dots \right. \\
 &= \left[ \log (N+N'_1) - \log N \right] : \left[ \log (N+N'_2) - \log N \right] : \dots \\
 &= \left[ \log \left( 1 + \frac{N'_1}{N} \right) \right] : \log \left( 1 + \frac{N'_2}{N} \right) : \dots \log \left( 1 + \frac{N'_n}{N} \right) \dots \dots (18)
 \end{aligned}$$

Une clé de répartition des coûts pourrait alors être calculée suivant la méthode A1 ou A2. Suivant la méthode A1, la répartition des coûts par groupe de charges par essieu = la répartition des coûts par charge par essieu suivant la méthode A2 =  $h_1 : h_2 \dots h_n$ .

Pour la méthode B, au lieu de  $h_2, h_3$ , etc.  $h_{1,2}, h_{1,2,3}$  sont calculés comme :

$$\begin{aligned}
 h_1 : h_{1,2} : h_{1,2,3} : \dots &= \log \frac{d}{d'_1} : \log \frac{d}{d'_{1,2}} : \log \frac{d}{d'_{1,2,3}} \dots \\
 &= \log \left( 1 + \frac{N'_1}{N} \right) : \log \left( 1 + \frac{N'_1+N'_2}{N} \right) : \log \left( 1 + \frac{N'_1+N'_2+N'_3}{N} \right) : \dots \dots (19)
 \end{aligned}$$

qui sert à calculer la clé de répartition selon la façon décrite dans le rapport.

Le grand inconvénient de cette méthode est toutefois que la clé de répartition dépend entièrement du dimensionnement de la vieille chaussée, ensuite de la durée de vis projetée, c'est-à-dire de  $d$  (ici  $N$ ), et enfin de  $\sum n'$  (la relation  $N'_1 : N'_2 : \text{etc.} = n'_1 f_1 : \dots = \frac{\sum n'}{100} (q'_1 f_1 + q'_2 f_2 + \dots)$ )

Si notamment on fait approcher  $N + N'_1$  de  $N$ , le premier terme de cette clé de répartition s'approche de 0. La clé de répartition des coûts sera différente pour toutes les routes reconstruites tandis que les différences peuvent être considérables. Prenons l'exemple d'une chaussée où l'on mesure une déflexion de  $1825/\mu\text{m}$  (sous une charge par roue de 4 tonnes). La formule (17) nous indique que  $N = 10^5$  (charges par roue équivalentes à 4 tonnes admissibles). Si l'on veut rendre cette (vieille) chaussée suffisante pour  $n'_1 = 7 \cdot 10^7$  et  $n'_2 = 3 \cdot 10^7$  nouvelles charges par roue de respectivement 0,5 et 3 tonnes, c'est-à-dire  $N'_1 = 1,7 \cdot 10^4$  et  $N'_2 = 9,5 \cdot 10^6$  charges d'essieu équivalent à 4 tonnes (équivalence calculée au moyen de la formule  $P^4$  légèrement modifiée par l'utilisation des facteurs d'équivalence AASHO proprement dits et par les facteurs d'équivalence déflexion), on calcule  $h_1 : h_2 = 1 : 29$ .

Pour  $d_1$  on calcule  $1740/\mu\text{m}$  et pour  $d_2$   $447/\mu\text{m}$ .

Si par contre on prend  $N = 10^6$  ( $d = 910/\mu\text{m}$ ) et les mêmes valeurs pour  $N'_1$  et  $N'_2$  ou, ce qui donne le même résultat,  $N = 10^5$ , mais  $N'_1 = 1,7 \cdot 10^3$  et  $N'_2 = 9,5 \cdot 10^5$ , alors  $h_1 : h_2 = 1 : 140$ .

Bien que la méthode de dimensionnement-reprofillement déduite par Lasalle des relations de déflexion AASHO soit correcte, une clé de répartition des coûts calculée sur cette base par addition graduelle de catégories de charges par essieu doit être rejetée parce que les résultats ainsi obtenus dépendent entièrement de facteurs qui ne peuvent influencer une clé rationnelle de répartition des coûts.

Les exemples donnés de charges par essieu de 0,5 tonne et 3 tonnes sont contestables parce que les mesures de déflexion AASHO ne comprennent aucune charge par roue inférieure à 1,35 tonnes. On peut donc affirmer à bon droit que des clés de répartition des coûts pour des charges par roue plus faibles, c'est-à-dire pour des voitures de personnes, ne peuvent être calculées à partir de formules de déflexion AASHO (contrairement aux formules de dimensionnement AASHO !).

C'est pourquoi nous donnons un nouvel exemple de répartition du trafic de  $n_1 = 10^7$  charges par roue de 1,35 tonnes, c'est-à-dire  $N_1 = 1,3 \cdot 10^5$  applications de charges par roue équivalent à 4 tonnes (\*) et  $n_2 = 10^6$  charges par roue de 6,8 tonnes, c'est-à-dire  $8,4 \cdot 10^6$  applications équivalent à 4 tonnes. Supposons que la route ait, avant la reconstruction, une déflexion  $d' = 1900 \mu m$ , c'est-à-dire  $N = 8,9 \cdot 10^4$  applications équivalent à 4 tonnes. On peut calculer que la déflexion, pour une addition de  $N_1$  doit être de  $1450 \mu m$ , et pour une addition de  $N_2$ , de  $470 \mu m$ . La clé de répartition des coûts par catégorie est alors  $\log(1+1,46) : \log(1+94,5) = 1 : 5,1$ . Si  $N = 8,9 \cdot 10^5$ , on obtient  $\log(1+0,146) : \log(1+0,945) = 1 : 17$  et si  $N = 8,9 \cdot 10^6$  on trouve  $\log(1+0,146) : \log(1+0,945) = 1 : 48$ .

Les chiffres n'indiquent donc pas de différences tellement excessives, tandis que la dernière clé de répartition correspond mal à la réalité, car elle se rapporte à une reconstruction pour un nombre d'applications de charges admissibles plus faible que celui qui est déjà passé sur la chaussée.

Signalons à titre de comparaison que la clé de répartition des coûts de "dimensionnement" aurait fait trouver  $D_1 : D_2 = (10 \cdot 1,35^4)^{1/6} : (6,8^4)^{1/6} = 1 : 2$ .

(\*) facteurs d'équivalence à nouveau calculés suivant  $P_1^4 : P_2^4 = \frac{1,35^4}{4} = 0,013$  et  $f_2 = \frac{6,8^4}{4} = 8,4$  tandis que  $P_1^4 : P_2^4 = 1 : 645$ .

./.

Au reste, il est utile de songer qu'une telle méthode de reprofilage est certes basée sur des déflexions mesurées sur des routes existantes, mais qu'elle est pour le reste basée entièrement sur les résultats AASHO pour ce qui concerne l'emploi de la formule (17).

Il n'existe cependant aucune autre source permettant de puiser une telle relation entre la déflexion et le nombre d'applications de charges. Pour ce qui est de la formule (12) utilisée, elle peut être déduite de la "formule de dimensionnement-déflexion" AASHO (9), mais elle peut aussi être admise sur la base de diverses autres méthodes de dimensionnement.

A l'aide de la formule (9) on peut d'ailleurs calculer facilement  $h, h_1, h_2 \dots, h_{1,2}, h_{1,2,3}$ , etc. après que  $d, d_1, d_2 \dots, d_{1,2,3}$ , etc. ont été calculés à l'aide de la formule (17), de sorte que l'on peut également déterminer de cette façon les mêmes clés de répartition des coûts.

Il faut également considérer que l'emploi de la formule AASHO (17) pour reconstruction sur la base de mesures de déflexion doit impliquer l'application du critère d'aptitude au service  $p_0 = 4,5$   $p = 2,5$  de l'essai AASHO, tandis que les limitations de cet essai mentionnées dans le rapport, dans lequel ne sont en fait pas définies de formules de reconstruction, valent également pour ces calculs de déflexion.

Dans l'essai AASHO, les relations (1) à (10) indiquent le lien entre l'indice d'épaisseur (avec équivalence d'épaisseur uniquement valable pour les déflexions), la charge par roue et la déflexion mesurée sous cette charge par roue :  $D = \text{fonction}(P, d)$ . Les relations (13) à (17) donnent le rapport entre le nombre d'applications de charges admissibles, la charge par roue et cette déflexion :  $n = \text{fonction}(P, d)$ . La combinaison de ces deux relations permettra de déduire une formule générale AASHO de dimensionnement-déflexion.

Pour la déflexion totale au printemps, on doit appliquer les formules (5) et (15), à partir desquelles on peut calculer :

$$4,42 \log (D + 1) = 1,05 \log 2P + 0,308 \log n - 1,46$$

$$\text{et } D = \frac{P^{0,238} \cdot n^{0,0697}}{1,815} - 1 \dots\dots\dots (20)$$

$$\text{En outre, } n_1 : n_2 : \dots : n_{n-1} : n_n = P_n^{3,4} : P_{n-1}^{3,4} : \dots : P_2^{3,4} : P_1^{3,4} \dots \dots (21)$$

valable pour D = constant. Ceci est donc l'équivalence de charge par essieu pour les déflexions.

$$\text{De même, } d_1 : d_2 : \dots = P_1^{1,46} : P_2^{1,46} : \dots\dots\dots (22)$$

valables pour D = constant. Pour un indice d'épaisseur égal, les déflexions mesurées sous diverses charges par roue se comportent comme ces charges par roue à la puissance 1,46.

A l'aide de la formule d'équivalence de charge par essieu maintenant calculée, on peut, en utilisant des charges par roue équivalant à 4 tonnes, écrire également comme suit la formule de déflexion-dimensionnement :

$$D = 0,767 \cdot n_{\text{eq.4t}}^{0,07} - 1 = 0,767 \left[ \left\{ n_1 \left\{ \frac{P_1}{4} \right\}^{3,4} \right\} \right]^{0,07} - 1 \dots\dots\dots (23)$$

A l'aide de cette formule, on peut déduire la forme générale de la relation exprimée par la formule (19) :

L'indice d'épaisseur (pour déflexions) de la chaussée à reconstruire devient (n<sub>1</sub>, n<sub>2</sub>, etc. sont les chiffres admissibles d'applications de charges par roue P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>).

$$D_{1,2..n} = K \left[ n_1 \left( \frac{P_1}{4} \right)^{3,4} + n_2 \left( \frac{P_2}{4} \right)^{3,4} + \dots \right]^{0,07} - 1 = K \cdot N^{0,07} - 1$$

./.

Ces indices d'épaisseur sont, après addition des nouveaux nombres d'applications de charges  $n_1^i, n_2^i, \text{etc.}$  par roue  $P_1, P_2, \text{etc.}$  d'où l'on peut calculer les applications  $N_1^i, N_2^i, \text{etc.}$  équivalentes correspondantes :

$$D_{1,2..n} + \Delta D_1 = K \left[ n_1 \left(\frac{P_1}{4}\right)^{3,4} + n_2 \left(\frac{P_2}{4}\right)^{3,4} + \dots + n_1 \left(\frac{P_1}{4}\right)^{3,4} \right]^{0,07} - 1 = K \left[ N + N_1^i \right]^{0,07} - 1$$

$$D_{1,2..n} + \Delta D_2 = K \left[ n_1 \left(\frac{P_1}{4}\right)^{3,4} + n_2 \left(\frac{P_2}{4}\right)^{3,4} + \dots + n_2^i \left(\frac{P_2}{4}\right)^{3,4} \right]^{0,07} - 1 = K \left[ N + N_2^i \right]^{0,07} - 1, \text{ etc.}$$

$$\Delta D_1 = K \left[ N + N_1^i \right]^{0,07} - K \cdot N^{0,07} \quad \left\{ N = N_1 \right.$$

$$\Delta D_2 = K \left[ N + N_2^i \right]^{0,07} - K \cdot N^{0,07} \quad \text{et } N^i = \left\{ N_1^i \right.$$

$$\Delta D_1 : \Delta D_2 : \dots = \left[ \left\{ 1 + \frac{N_1^i}{N} \right\}^{0,07} - 1 \right] : \left[ \left\{ 1 + \frac{N_2^i}{N} \right\}^{0,07} - 1 \right] : \dots \quad (24)$$

Si  $N^i = RN$  et la répartition  $q$  (répartition en pourcent des diverses catégories de charges par essieu avant et après reconstruction) restent égaux, c'est-à-dire que  $n_1^i = Rn_1, n_2^i = Rn_2, N_1^i = RN_1, N_2^i = RN_2, \text{etc.}$  on peut écrire aussi :

$$\left[ \left\{ 1 + \frac{Rq_1 f_1}{q_1 f_1} \right\}^{0,07} - 1 \right] : \left[ \left\{ 1 + \frac{Rq_2 f_2}{q_2 f_2} \right\}^{0,07} - 1 \right] : \dots \quad (25)$$

dans lequel il faut substituer  $\left(\frac{P}{4}\right)^{3,4}$  au facteur d'équivalence  $f$ ;

La dépendance de cette clé de répartition de l'ampleur de la reconstruction par rapport au dimensionnement de l'ancienne chaussée s'exprime ici dans les termes  $R$  et  $\left\{ q_i f_i \right\}^{0,07}$ .

Cette formule générale de déflexion-dimensionnement permet cependant d'établir une clé de répartition indépendante de ces paramètres.

A l'aide de la formule (20) on peut calculer comme suit l'épaisseur pour une circulation homogène pour une extension de la circulation de n à n' applications de charges :

$$\Delta D = \frac{P^{0,24} (n^{0,07} - n'^{0,07})}{1,8} = \frac{P^{0,24} n^{0,07} (R-1)}{1,8} \dots\dots\dots (26)$$

$$\begin{aligned} \Delta D_1 : \Delta D_2 : \dots : &= P_1^{0,24} \cdot n_1^{0,07} : P_2^{0,24} \cdot n_2^{0,07} : \dots\dots\dots \\ &= P_1^{0,24} \cdot q_1^{0,07} : P_2^{0,24} \cdot q_2^{0,07} : \dots\dots\dots (27) \end{aligned}$$

Cette formule n'est pourtant pas nécessaire du fait que les épaisseurs ainsi calculées ne se rapportent qu'à une déflexion identique.

Il est évident que les épaisseurs provenant de la formule de dimensionnement proprement dite entrent à nouveau en ligne de compte pour le calcul parce que, dans l'indice d'épaisseur  $D = \{d_1 h_1$  ainsi déterminé, le comportement total de la chaussée est excompté, même en tant que fonction de charges légères par roue (0,45 tonne) et d'essieux tandems. On s'attend également à ce qu'une telle formule de dimensionnement s'applique aussi aux constructions d'un autre type, par exemple les chaussées d'asphalte à stabilisation de ciment ou à couche de base de construction bitumineuse. Il faut alors s'attendre à un autre type de comportement pour le dimensionnement de la déflexion, surtout dans le premier cas. Au reste, pour les chaussées de béton de l'essai AASHO, on a obtenu lors de la mesure des déflexions (effectuées en divers points de la plaque de béton) des relations de même forme (lors d'un examen à une échelle nettement plus petite.)

Sans nier l'intérêt des mesures de déflexion pour déterminer la force portante de la chaussée, ainsi qu'il est ressorti des séries principales de l'essai AASHO, il convient cependant de formuler les remarques générales suivantes :





Les mesures de déflexion sont une expression du comportement (apparemment) élastique de la construction des routes : le fléchissement réversible du revêtement sous une charge (semi-) statique. Ce fléchissement est, dans le cas de l'asphalte, très sensible à la température et est déterminé dans une large mesure par des paramètres n'appartenant pas au dimensionnement du revêtement (température de l'asphalte, nature du sous-sol, saison). La déflexion mesurée - même quand elle n'est pas combinée au rayon de courbure - n'est pas un paramètre primaire généralement utilisable de la qualité de la chaussée, comme par exemple l'étirement qui se manifeste au-dessous de la chaussée (si l'étirement admissible est connu comme fonction du matériau utilisé et du nombre d'applications de charges).

N.B.:

Les clés de répartition pour reconstruction données dans les formules (24) et (25) (qui sont d'ailleurs considérées comme inexactes) peuvent naturellement être calculées aussi bien sur la base des "formules de dimensionnement" AASHO.

On procède alors come suit

$$D_{1,2..n} = K \left\{ \langle n_1 f_1 \rangle \right\}^{1/6} \dots \dots \dots (28)$$

$$D_{1,2..n} + \Delta^{D_1} = K \left\{ \langle n_1 f_1 + n'_1 f_1 \rangle \right\}^{1/6}$$

$$D_{1,2..n} + \Delta^{D_2} = K \left\{ \langle n_1 f_1 + n'_2 f_2 \rangle \right\}^{1/6}$$

$$\text{en l'occurrence } D_{1,2..n} + \Delta^{D_{1,2}} = K \left\{ \langle n_1 f_1 + n'_1 f_1 + n'_2 f_2 \rangle \right\}^{1/6}$$

etc.

$$D_{1,2..n} + \Delta^{D_{1,2..n}} = K \left\{ \langle n_1 f_1 + \langle n'_1 f_1 \rangle \right\}^{1/6}$$

On peut calculer alors  $\Delta^{D_i}$  comme la différence des termes respectifs et (28)

Si le type q-P est, après reconstruction, identique au type avant reconstruction et si  $R = \frac{n'}{n} = \frac{n'_1}{n_1} = \frac{n'_2}{n_2} = \text{etc.}$ , on obtient

$$\Delta^{D_1} : \Delta^{D_2} : \dots = \left[ \left( \langle q_1 f_1 + R q_1 f_1 \rangle \right)^{1/6} - \left( \langle q_1 f_1 \rangle \right)^{1/6} \right] ;$$

$$\left[ \left( \langle q_1 f_1 + R q_2 f_2 \rangle \right)^{1/6} - \left( \langle q_1 f_1 \rangle \right)^{1/6} \right] ; \text{ etc.}$$

Cette clé de répartition des coûts (c'est-à-dire la méthode A1 pour les catégories de charges par essieu ou A2 pour les applications) dépend à nouveau de la grandeur relative de la reconstruction (R), c'est-à-dire de la nature des constructions ancienne et nouvelle.

Cela n'est pas acceptable si l'on considère que l'on trouve actuellement des répartitions des coûts entièrement différentes, si une chaussée est construite directement pour une durée de vie déterminée (nombre déterminé d'applications de charges) ou si elle est construite en deux étapes ou plus. On obtient ainsi une clé de répartition des coûts pour chaque répartition imaginable !

Figures 7 et 8 :

deflectie = deflexion

voorjaar = printemps

najaar = automne

dikteindex voor deflecties = indice d'épaisseur pour déflexion

aantal belastingherhalingen, gecorrigeerd voor seizoensinvloeden =  
nombre d'applications de charges corrigé des influences saisonnières

deflectie bij kruipsnelheid in  $\mu$  = déflexion pour une vitesse extrêmement  
faible, en microns