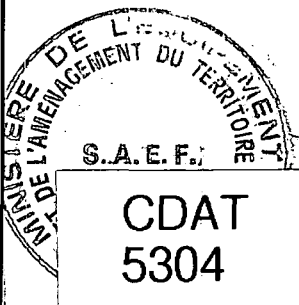


**INFLUENCE  
de la CIRCULATION LOURDE  
sur les DEPENSES  
d'ENTRETIEN des ROUTES**

(Adaptation des A.A.S.H.O. TESTS)

Rapport de MM. J.P. PARAYRE et P. SUARD  
Ingénieurs des Ponts et Chaussées



Paris, le 1er Octobre 1963

RAPPORT de MM. J.P. PARAYRE et P. SUARD

Ingénieurs des Ponts et Chaussées

à

Monsieur le Chef du Service des Affaires Economiques et  
Internationales

OBJET. - Influence de la circulation lourde sur les dépenses d'entretien des  
routes



SOMMAIRE -

Rapport : Texte : P. 1 à 19  
Figures : 1, 2, 3 et 4  
Graphiques: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8  
- o -  
Annexe : Texte : P. A-1 à A-10  
Graphiques: A-1, A-2 et A-3.

.....

## I - CADRE et CONTENU de l'ETUDE

I-1 - Le Service des Affaires Economiques et Internationales du Ministère des Travaux Publics et des Transports a entrepris l'étude des bases économiques sur lesquelles pourraient se fonder les taxes frappant les véhicules et les carburants. Il s'agit de déterminer quelles sont les dépenses occasionnées par la circulation routière aux collectivités qui ont la charge de construire et d'entretenir le réseau routier. Il s'agit aussi d'analyser comment ces dépenses varient en fonction de l'importance, de la nature et de la régularité de la circulation de façon à pouvoir faire assurer par des taxes spécifiques, notamment sur les carburants, la couverture de ces charges analysées bien entendu dans l'optique du développement.

Pour mener à bien cette analyse, il avait été décidé de procéder, en plusieurs étapes :

- d'abord à la recherche des effets sur les coûts de production des produits pétroliers et les prix de revient des transports, de différents niveaux de taxes sur l'essence et le gas-oil en vue de déterminer la relation entre ces taxes qui minimisent les dépenses de production, en assurant l'utilisation de l'essence et du gas-oil, dans leur domaine naturel;
- puis à l'analyse des coûts de construction et d'entretien des infrastructures routières en décelant dans la mesure du possible la responsabilité à leur égard des divers types de circulation;
- enfin, la traduction par des taxes judicieuses sur les carburants et les véhicules de la contribution équitable à la couverture des dépenses d'infrastructure, en tenant compte notamment des résultats de la première étape.

I-2 - L'étude qui suit veut être une contribution à la deuxième étape. Elle porte sur les dépenses de construction et d'entretien de la chaussée, mais pas sur les dépenses d'établissement de la plateforme et des ouvrages d'art.

Les Ingénieurs routiers ont toujours considéré que la circulation lourde a une responsabilité plus grande dans la destruction des chaussées, donc conditionne leur structure à la construction. Mais, traditionnellement, on ajoute qu'il s'agit là d'un problème très complexe, difficilement quantifiable. Dans cette optique, il s'ensuit que toute analyse chiffrée des dépenses d'entretien en fonction des divers types de circulation est illusoire, sinon impossible.

En fait, des préoccupations analogues à celles du S.A.E.I. se sont posées aux Etats-Unis il y a quelques années et ont conduit à entreprendre des expérimentations en vraie grandeur et sur très grande échelle pour étudier la dégradation des chaussées sous l'influence d'applications répétées de charges lourdes (essais A.A.S.H.O.). Il nous a semblé intéressant d'essayer d'appliquer au cas français les résultats de ces expériences.

Les conditions de l'application sont exposées ci-après. De nombreuses hypothèses ont dû être faites et chaque fois nous nous sommes efforcés d'en apprécier les conséquences et d'alerter le lecteur.

Nous avons sur la base des résultats A.A.S.H.O. et avec des valeurs numériques prises dans le cas français, calculé l'amortissement théorique au véhicule kilomètre nécessaire pour couvrir les dépenses de construction et d'entretien de la chaussée. Nous nous sommes assurés du bien fondé de cette analyse en recoupant le total des amortissements calculés sur la base des chiffres théoriques et pour l'ensemble de la circulation, par la totalité des dépenses que les collectivités engagent pour la maintenance du réseau routier. En fait, nous avons fait cette comparaison pour le réseau des routes nationales en 1960.

Le résultat de l'étude consiste finalement, avec toutes les réserves et sous toutes les conditions qui vont être développées, dans un essai d'analyse chiffré des dépenses d'entretien des routes en fonction de la circulation lourde. Ces dépenses devraient être complétées par celles de la construction des plateformés ; si l'on veut aboutir au coût de chacun des catégories de circulation, il serait nécessaire, en outre, de préciser les notions de débit des routes et l'influence à cet égard de la circulation lourde comme de la circulation légère.

## II - BUTS de l'A.A.S.H.O. ROAD TEST et RESULTATS EXPLOITES

Il nous paraît opportun, avant d'énoncer les principaux résultats de l'A.A.S.H.O. ROAD TEST, de rappeler rapidement l'historique de cet essai, ce qui permettra de le replacer dans la cadre des études économiques du transport routier qui sont actuellement en cours aux Etats-Unis et ainsi de mieux saisir les buts précis de cette expérimentation en vraie grandeur.

### II-1 - Historique

- Suivant en cela un phénomène général, la circulation routière a considérablement augmenté aux Etats-Unis. Le parc a doublé de 1945 à 1955. Cet essor, joint à l'emploi de plus en plus général d'essieux lourds, rendit indispensable la révision des conceptions jusqu'alors appliquées en matière d'entretien et de construction des chaussées.

Depuis longtemps déjà de nombreux Ingénieurs étaient conscients du fait que les caractéristiques techniques qu'il fallait exiger d'une route dépendaient essentiellement de la charge par essieu des véhicules qui l'empruntaient; mais les véhicules lourds étaient alors trop peu nombreux pour que cette préoccupation devint essentielle. Dès 1922 pourtant des essais entrepris dans l'Illinois confirmaient qu'il importait de parvenir à relier la structure de la chaussée à la charge maximale admise par essieu. Ces considérations conduisirent certains états vers les années 1930 à imposer pour la charge par essieu une limite maximum variant entre 16.000 livres et 22.400 livres. L'apparition des pneus basse pression et des essieux tandems firent porter les maximum conseillés par l'AMERICAN ASSOCIATION of STATES HIGHWAY OFFICIALS (A.A.S.H.O.) à 18.000 livres pour l'essieu simple et 32.000 pour l'essieu tandem. Mais ces recommandations étaient loin d'être suivies par tous les Etats.

Cependant, l'importance des transports routiers continuait de croître. Entre 1936 et 1949 le nombre d'essieux de plus de 18.000 livres progressait de 13 à 86 pour mille, ce qui, joint à l'accroissement des parcours moyens, multipliait par quinze le nombre de charges lourdes appliquées aux routes. Cette augmentation de la fréquence d'application entraîna une augmentation sensible des dépenses d'entretien du réseau routier. Certaines routes, dont la chaussée de faible épaisseur avait pendant des années bien supporté un trafic comportant peu d'essieux lourds, étaient mises rapidement hors d'usage.

Si ces dégradations étaient reconnues par tous, l'unanimité ne se faisait pas sur leurs causes exactes. Les conceptions

économiques du transport routier et de l'infrastructure n'étaient alors par liées. Le besoin se faisait donc sentir de données complémentaires pour apprécier la taille et le poids par essieu limites du poids lourd, conduisant à l'économie globale optimum des transports. Dans ce but, le HIGHWAY RESEARCH BOARD créait en 1946 un Comité d'Etudes Economiques chargé de définir les caractéristiques d'un tel véhicule.

Ce problème avait deux aspects :

- 1°/ Détermination des résistances et des capacités des routes existantes,
- 2°/ Caractéristiques des poids lourds et des chaussées permettant d'assurer l'économie optimum des transports routiers.

Le Comité H.R.B. se chargea d'établir les normes de tels poids lourds en coopération avec l'industrie automobile et les principaux transporteurs routiers. Certaines études partielles sur les consommations et les coûts d'entretien des véhicules de charge utile élevée ont déjà été publiées, en particulier "FREIGHT'S the WEIGHT" en 1958.

Dans le même temps l'A.A.S.H.O. s'efforçait de réunir des informations sur l'influence de la charge par essieu sur le comportement des chaussées.

La complexité de la résolution mathématique de ce problème imposait le recours à une expérimentation poussée. Un certain nombre d'essais en vraie grandeur eurent lieu sur des routes existantes. La difficulté d'isoler l'influence des multiples facteurs conduisit la WESTERN ASSOCIATION of STATES HIGHWAY OFFICIALS à proposer la construction de routes spécialement destinées aux essais. La première application de cette idée fut en 1952, dans l'Etat d'IDAHO, le WASHO ROAD TEST ; la seconde d'une importance bien plus considérable, l'A.A.S.H.O. ROAD TEST.

## II-2 - Buts et objectifs de l'A.A.S.H.O. ROAD TEST

Le rapport de Mai 1955 du Comité de l'A.A.S.H.O. chargé des transports mettait quatre points en évidence :

- 1°/ le coût unitaire de transport d'une charge donnée peut être diminué par l'utilisation de charges par essieu plus importantes que celles autorisées à cette date;

.....

- 2°/ le coût de construction d'une chaussée augmente avec l'importance de la charge par essieu qu'elle doit supporter suivant une loi non établie;
- 3°/ il existe également un coût d'entretien nécessaire pour maintenir une route en état pour les véhicules de tourisme, compte tenu en particulier des effets destructeurs liés au climat;
- 4°/ il est donc possible de répartir les coûts de construction et d'entretien d'une route parmi ces divers utilisateurs suivant une taxation équitable.

En fait, la solution totale du problème des transports routiers nécessitant un effort de longue haleine, l'A.A.S.H.O. ROAD TEST devait simplement tenter d'apporter une réponse aux questions les plus pressantes :

- 1°/ définir la conception et les caractéristiques des chaussées et des ponts nouveaux;
- 2°/ déterminer les possibilités des diverses chaussées existantes;
- 3°/ fournir les bases d'une législation nouvelle concernant les charges maximum admissibles et la taxation équitable des divers usagers;
- 4°/ fournir des éléments à l'industrie automobile afin de définir les caractéristiques du poids lourd dont l'emploi conduirait à l'économie optimale des transports;
- 5°/ donner des informations sur la construction et le coût des routes aptes à supporter diverses charges par essieu, afin d'en déduire la taxation correspondante.

Les buts de l'essai étant ainsi définis, le Comité de l'A.A.S.H.O. précisait en 1957 les objectifs à atteindre.

- 1°/ déterminer les relations statistiquement significatives existant entre le nombre d'applications d'essieux de poids et de dispositions divers et le comportement des chaussées souples et rigides d'épaisseur et de structure variables reposant sur une plateforme de caractéristiques connues;
- 2°/ déterminer l'effet de ces charges sur divers types d'ouvrages;
- 3°/ effectuer des études spéciales sur les accotements, le comportement de divers types de couches de base, l'adhérence, etc...

4°/ noter la nature et l'importance des travaux d'entretien nécessaires pour maintenir les pistes en état pendant toute la durée des essais.

## II-3 - Organisation des essais

### II-31 - Constitution des anneaux d'essais

Le principe directeur des essais fut de faire rouler sans arrêt, à intervalles réguliers et à vitesse constante (55km/h.), des camions de caractéristiques connues, sur des chaussées d'épaisseur variable, et de noter la dégradation de ces chaussées sous ce trafic.

Six anneaux d'essais furent construits, cinq étant livrés au trafic. Chaque anneau comportait 2 pistes d'essais en alignement droit, longues de 2.100 m., l'une en chaussée souple, l'autre en chaussée rigide (figure n°1). Chaque piste, composée de 2 voies identiques, était divisée en un certain nombre de sections. La structure de la chaussée était la même dans la section donnée et variait progressivement d'une section à l'autre. Chaque section de chaussée comportait donc 2 sections d'essais, une par voie (figure n°2).

La chaussée souple à laquelle nous nous intéressons était composée d'une couche de fondation en mélange de sable et gravier, d'une couche de base en calcaire dolomitique concassé et d'une couche de surface en béton bitumineux (figure n°3).

Chaque voie supportait un trafic composé de camions identiques. Il fut donc possible d'étudier les dégradations causées par 10 types de camions différents (figure n°4).

### II-32 - II-32 - Indice de service de la chaussée

Pour préciser le comportement des diverses sections au cours de l'essai, il fallait définir une grandeur dont la valeur caractérisât la qualité de la chaussée à un instant donné, du point de vue de l'utilisateur, et relier cet indice à certaines détériorations susceptibles d'être mesurées (ondulations longitudinales, ornières, fissures, etc...). Pour ce faire, on fit attribuer par plusieurs conducteurs une note variant de 5 (excellent) à 1 à diverses sections de routes existantes, la note étant basée uniquement sur l'état de la chaussée, abstraction faite de toute question de tracé, visibilité, etc..

La technique statistique, analyse de régression multiple, permit alors de relier cette appréciation subjective aux mesures d'irrégularités du profil longitudinal, du profil en travers (ornières) à l'étendue des fissurations et des réparations. On pu ainsi définir un indice de service de la chaussée variant pour les chaussées souples de 4,2 au moment de la construction, à 1,5 au moment où la réfection devient indispensable.



## II-33 - Choix des facteurs

Afin de pouvoir calculer les interactions entre les différents facteurs, le plan d'expérimentation choisi fut un plan factoriel complet, c'est-à-dire que chaque combinaison des diverses valeurs prises par les facteurs, devait être représentée dans une section de chaussée au moins. Ceci conduisit à limiter à 3 le nombre des facteurs dont on étudia l'influence :

- épaisseur de la couche de fondation
- épaisseur de la couche de base
- épaisseur de la couche de surface

Chaque épaisseur pouvait prendre 3 valeurs. Dans ces conditions une piste d'essai devait donc comporter au moins 27 sections, une section ayant 30 m. de longueur.

L'agencement des diverses sections à l'intérieur d'une même piste d'essai fut tiré au hasard ("randomisé") ainsi que les emplacements respectifs des 4 anneaux d'essais principaux. D'autre part, afin de déterminer si les différences de comportement entre sections de structures différentes étaient significatives, dans chaque piste d'essai, trois structures de chaussée furent réalisées deux fois.

## II-4 - Résultats

Un nombre considérable de mesures furent effectuées au cours de l'essai. Malgré l'importance des moyens de dépouillement mis en service les résultats de ces mesures ne sont <sup>encore</sup> que partiellement exploités. Nous allons simplement indiquer, parmi les conclusions auxquelles on a déjà pu aboutir, celles que nous utiliserons au cours de cette étude.

Un des principaux objectifs était d'établir une relation statistique entre le comportement d'une chaussée et le trafic d'essieux lourds qu'elle supporte. Pour préciser cette notion de comportement il fallait définir, à un instant donné, la plus ou moins grande aptitude d'une chaussée à supporter le trafic, donc élaborer une grandeur mesurable reflétant les qualités de roulement; ce fut l'indice de service "p" qui peut être calculé lorsque sont connues les déformations longitudinales et transversales de la chaussée.

.....

Le comportement d'une chaussée sous un trafic de caractéristiques données est donc défini par la valeur prise par l'indice de service après un certain nombre d'applications d'essieux. L'analyse statistique des résultats a alors montré que la structure des chaussées étudiées pouvait être caractérisée par un paramètre unique D, indice d'épaisseur, cet indice étant une combinaison linéaire des épaisseurs des diverses couches constitutives de la chaussée.

Plusieurs modèles mathématiques pouvaient permettre d'interpréter le comportement d'une chaussée d'indice d'épaisseur D sous un trafic de caractéristiques données. Celui qui fut finalement choisi comme étant le plus satisfaisant s'écrit :

$$p = C_0 - (C_0 - C_1) \left[ \frac{W}{\rho} \right]^{\beta}$$

p est l'indice de service de la chaussée d'indice initial  $C_0$  qui a subi W applications d'essieux

$\rho$  et  $\beta$  sont des fonctions des caractéristiques du trafic considéré (poids et agencement des essieux) et de la structure de la chaussée définie par son indice d'épaisseur D.

Cette équation est une relation statistique : elle signifie avec les résultats expérimentaux obtenus que pour une épaisseur de chaussée donnée, au seuil de confiance 90% environ, le logarithme du trafic West compris dans l'intervalle  $\log W \pm 0,46$ . Cet intervalle de confiance correspond aussi pour l'indice d'épaisseur D (pour un certain nombre d'applications d'essieux) à  $D \pm 0,11 (D + 1)$ . L'incertitude est donc d'environ 0,14 D pour des chaussées relativement solides. Ces limites de confiance sont évidemment relatives aux conditions de l'essai.

### III - PRINCIPES de l'ETUDE

#### III-1 - Limite des résultats de l'A.A.S.H.O. Test

L'utilisation et la transposition des résultats de l'A.A.S.H.O. Test doivent être faites avec beaucoup de prudence. On est en effet conduit à extrapoler ces résultats de multiples façons.

Tout d'abord, bien que cet essai ait duré 2 ans, le nombre d'applications d'essieux qu'une chaussée doit supporter au cours de son existence est plus élevé que ceux qui ont été observés (de l'ordre du double).

---

Dans le cas où W est le nombre d'applications d'essieux pondérés par une fonction dépendant du climat.

.....

D'autre part, les résultats de l'essai sont relatifs à un trafic homogène et régulier. Peut-on les appliquer au trafic réel ? (On peut par exemple souligner que le trafic de l'A.A.S.H.O. Test nettement plus canalisé qu'un trafic réel provoqua des ornières d'une profondeur anormale).

Le principe même de cet essai et sa complexité, en exigeant des études préliminaires importantes et longues, a conduit à étudier des types de chaussées qui ne correspondent plus à la technique actuelle. En particulier, les couches de base en concassé sont de plus en plus fréquemment remplacées par des couches de base rigidifiées.

Enfin, comme le soulignent d'ailleurs les organisateurs de l'essai, on n'a pas étudié l'influence d'un nombre important de paramètres. Certains ont été maintenus constants pour ne pas augmenter davantage la complexité de l'essai; c'est le cas par exemple du sol de plateforme et des matériaux utilisés pour la construction des chaussées. D'autres ont varié de façon incontrôlable; c'est le cas des conditions d'environnement et plus spécialement du climat dont l'influence, soulignée par l'augmentation des déflexions constatées au printemps, amena à pondérer le nombre d'applications d'essieux par une fonction "climatique".

Ces résultats partiels demandent donc à être complétés par des essais secondaires et satellites. Il serait hardi de les utiliser pour dimensionner du point de vue technique une chaussée déterminée. En revanche, le caractère statistique des relations mises en évidence rend plus légitime leur utilisation dans une étude économique portant sur l'ensemble d'un réseau routier et autoroutier.

### III-2 - Principe de l'analyse

Si nous considérons une chaussée de structure déterminée, définie par son indice d'épaisseur, les résultats de l'A.A.S.H.O. Test nous permettent de prévoir quel sera son indice de service, donc son état, après un nombre quelconque d'applications d'un essieu donné (graphique 1).

Pour connaître le coût d'entretien d'une telle chaussée nous avons admis qu'une route à grande circulation ou une autoroute devait être un outil aussi parfait que possible : il n'est pas envisageable de venir fréquemment réparer la chaussée sous le trafic. Le seul entretien que nous avons donc pris en considération consiste en la mise en oeuvre d'une couche de béton bitumineux au moment où

la chaussée ne présente plus un état de surface satisfaisant. Par analogie avec les résultats de l'essai, nous avons admis que ceci a lieu lorsque l'indice de service s'abaisse à 2,5. Il est donc possible de déterminer pour une chaussée de structure donnée, soumise à un trafic constant (1) de caractéristiques connues, la fréquence de l'entretien. Nous avons considéré d'autre part, qu'en première approximation, pour des chaussées suffisamment résistantes, le coût de cet entretien serait à peu près indépendant de l'indice d'épaisseur de la chaussée.

Connaissant le coût et la fréquence de l'entretien qui pour un trafic donné dépend de l'indice d'épaisseur, on peut déterminer la dépense totale actualisée d'entretien de la chaussée qui est une fonction de l'indice d'épaisseur  $D$  et du trafic. Les dépenses d'entretien diminuent lorsque  $D$  augmente, et augmentent lorsque le trafic annuel augmente.

D'autre part, en moyenne, le coût de construction de la chaussée dépendra essentiellement de son indice d'épaisseur. Il augmente avec l'indice d'épaisseur.

Il est donc possible de calculer les dépenses actualisées de construction et d'entretien d'une chaussée de structure donnée, en fonction du volume de trafic annuel supposé homogène. En cherchant à minimiser cette fonction de l'indice d'épaisseur, nous définissons pour un volume annuel donné de trafic, une épaisseur optimum de la chaussée, donc la fonction  $D$  optimum ( $W_0$ ) (graphique 2). Il existe une relation de ce genre pour chaque type d'essieu.

Il est facile d'en déduire le coût total actualisé d'entretien et de construction de la chaussée, en fonction du trafic d'un essieu donné, donc de calculer le coût moyen par essieu et le coût marginal d'un essieu supplémentaire dans le trafic annuel de base, essieu qui s'applique/chaque année (graphiques 3-4-5).  
donc

Enfin, la connaissance de l'épaisseur optimum en fonction du trafic annuel permet de déterminer la durée de vie de la chaussée à l'optimum. Cette durée de vie dépend de la nature des essieux (graphique 6).

---

(1) Il s'agit d'une hypothèse simplificatrice sur laquelle nous reviendrons.

#### IV - RESULTATS et INTERPRETATIONS

##### IV - 1 - Résultats à caractère technique

##### IV - 11 - Epaisseur optimum (graphique 2)

- Nous avons choisi une coupe de chaussée comportant une couche de base rigidifiée au ciment. Les calculs correspondants sont détaillés en annexe. Il fallait tout d'abord définir l'indice d'épaisseur de ce type de chaussée : nous avons utilisé pour cela les essais spéciaux de l'A.A.S.H.O. Test sur les couches de base. Puis les coûts de construction ont été déduits d'une étude de prix effectuée en 1962 par un Service des Ponts et Chaussées. (Voir Annexe P. A-5).
  
- Les variations de l'indice d'épaisseur optimum en fonction du trafic de base annuel sont représentées par les graphiques 4. Nous constatons que l'épaisseur optimum croît, comme il est naturel, d'une part avec le volume de trafic annuel et d'autre part avec la charge par essieu. Il faut souligner ici que l'A.A.S.H.O. Test a montré qu'un essieu tandem avant sensiblement les mêmes effets qu'un essieu simple de poids moitié.

Les indices d'épaisseur optimum auxquels nous aboutissons sont en fait voisins de ceux des chaussées d'autoroutes que l'on construit actuellement. Nous voyons par exemple que pour un trafic de 250.000 essieux de 10 T. par an, l'indice d'épaisseur optimum est de 5,3, ce qui peut être obtenu par exemple par une chaussée composée de :

- une couche de surface en béton bitumineux, de 10 cm,
  - une couche de base rigidifiée au ciment, de 20 cm,
  - une couche de fondation de 40 cm.
- 
- En toute rigueur, les épaisseurs optimales ainsi obtenues sont valables pour la coupe type de chaussée que nous venons d'étudier (couche de base rigidifiée au ciment quatre fois plus épaisse que la couche de surface - couche de fondation dix fois plus épaisse que la couche de surface). Notre choix est, d'ailleurs, arbitraire et devrait être précisé par la recherche de la coupe de chaussée optimale permettant d'obtenir un indice d'épaisseur donné au moindre coût. En réalité, cette expression linéaire de l'indice d'épaisseur n'est valable que dans certaines limites fixées par la technique : une optimisation abusive avec cette fonction conduirait, en effet,

.....

à ne conserver qu'une couche de chaussée.

D'autre part, si nous comparons les expressions de l'indice d'épaisseur de la chaussée la plus économique

$$D = 0,44 D_1 + 0,24 D_2 + 0,09 D_3 \quad (1)$$

surface                                  base                                  fondation

et du coût  $C = 2,9 D_1 + 1,3 D_2 + 0,41 D_3 + \text{constante}$ ,

nous constatons que les rapports des coefficients des diverses couches ne sont pas très différents (6,6 - 5,4 - 4,6) d'autant plus qu'une incertitude certaine règne sur les prix et sur les coefficients exacts de l'indice d'épaisseur.

Si donc nous obtenons un indice d'épaisseur voulu à l'aide d'une structure différente de la chaussée, le coût ne variera guère. Or, les calculs effectués nous ont montré qu'une variation importante des coûts de construction et d'entretien ne se répercutait que très faiblement sur l'indice d'épaisseur optimum (voir annexe). Nous pouvons donc admettre que cet indice optimum est valable dans de très larges limites pour les proportions existantes entre les différentes couches de chaussée.

Nous aurions pu considérer une couche de base en enrobés, les essais spéciaux de l'A.A.S.H.O. Test montrent que le coefficient d'une telle couche dans l'indice d'épaisseur serait environ 0,30; comme le prix de ces enrobés est d'environ 0,75 F/cm et m<sup>2</sup> soit 2,9 F/m<sup>2</sup> et nous retrouvons un rapport prix/indice de 6,3 - Compte-tenu du caractère approximatif de cette étude, les indices d'épaisseur optimum ainsi calculés sont donc valables quels que soient le type et la structure de chaussée.

#### IV-12 - Recherche d'un essieu standard

Nous n'avons considéré jusqu'à présent qu'un trafic parfaitement homogène. L'étude d'un trafic réel serait grandement facilitée par l'établissement d'une équivalence entre les divers types d'essieux du point de vue de leurs effets destructeurs sur la chaussée.

Une telle correspondance existe, en effet, de façon satisfaisante, pour des volumes annuels de trafic assez importants (entre 50.000 et 250.000 passages d'essieux lourds par an) comme cela est montré en annexe.

---

(1) les épaisseurs sont exprimées en pouce = 2,54 cm

Un essieu de 13 Tonnes équivaut à 2,7 essieux de 10 T. et un essieu double de 16 T. au total à 0,6 essieu de 10 T.

Il est donc possible dans ces conditions, si l'on connaît la composition du trafic, de calculer le trafic de 10 T. qui aurait le même effet que le trafic réel et donc de définir une épaisseur optimum de la chaussée soumise à un trafic hétérogène.

Les chiffres précédents (comme le graphique A3) montrent que les effets destructeurs des essieux décroissent très vite avec leur charge, et qu'en particulier au-dessous de 3 T. le passage des essieux est parfaitement négligeable.

#### IV-13 - Durée de vie de la chaussée (graphique 6)

Nous rappelons qu'il faut entendre par durée de vie de la chaussée l'intervalle qui sépare deux réfections successives. Il existe une valeur optimum pour cette durée de vie. Elle signifie que le surcroît de dépenses de construction nécessaire pour espacer davantage les réfections n'est plus compensé par l'économie d'entretien.

La durée de vie optimale de la chaussée diminue lorsqu'augmentent le trafic et le poids des essieux. Elle varie cependant relativement peu. Pour un essieu de 13 T., elle est comprise entre 15 et 14 ans pour un trafic variant de 100 à 250.000 essieux/an. Pour un essieu de 10 T., elle est voisine de 16 ans. Ces chiffres sont tout-à-fait concordant avec ceux qui sont actuellement admis par les Ingénieurs routiers français.

Pour des volumes de trafic importants, le coût d'entretien étant lui-même constant, **il résulte de cette** constance de la durée de vie que les dépenses totales actualisées d'entretien varient relativement peu (entre 2,5 et 3 F. par m<sup>2</sup>) avec la composition et l'importance du trafic.

Elles ne représentent d'ailleurs même pas le dixième du coût de construction.

.....

IV - 2 - Résultats à caractère économique

IV-21 - Signification pratique des coûts moyen et marginal

Le coût moyen calculé dans ce rapport et représenté sur le graphique 3 a la signification de l'amortissement normal par essieu et km des dépenses de construction et d'entretien de la chaussée. Il ne couvre pas cependant les investissements correspondant à l'établissement de la plateforme et des ouvrages d'art. Pour avoir un coût moyen complet, il serait nécessaire bien sûr de prévoir un amortissement de ces autres dépenses.

Le coût moyen est calculé dans l'hypothèse d'un trafic constant dans le temps. L'hypothèse d'un trafic croissant, plus réaliste, entraîne une très grande complexité des calculs et nous n'avons pas jugé qu'il était nécessaire en première phase de l'entreprendre. L'hypothèse du trafic constant nous fournit en fait une bonne approximation des résultats.

Le coût marginal calculé ici représente le supplément de coût (construction et entretien) par essieu et par an entraîné par une augmentation du trafic de base d'un essieu par an. Il correspond exactement à la présentation élémentaire du coût marginal à long terme. En fait, il a toutes les imperfections de cette schématisation excessive de la réalité. Il correspond, en fait, à l'optique où l'on se pose le problème du dimensionnement du réseau "a priori", ce qui n'a guère de sens lorsque le réseau existant est aussi étendu qu'en France.

Dans le cas français, les dépenses marginales liées à l'augmentation du trafic lourd se concrétisent certes par des accroissements d'entretien du réseau existant, mais aussi par des extensions de ce réseau. Les dépenses marginales de cette nature, pour la part prise en compte dans ce rapport, se rapprochent beaucoup du coût moyen défini ici qui représente lui le coût du trafic supplémentaire correspondant (pour ce qui est de la chaussée) à l'extension du réseau. Pour cette raison, le coût moyen calculé dans ce rapport a plus de signification économique que le coût marginal tel qu'il a été défini ici.

Il était intéressant de calculer cependant le coût marginal comme cela a été fait, car l'ordre de grandeur de son rapport avec celui du coût moyen est instructif. Le coût marginal avec la définition donnée ici vaut à peu près dix fois moins à trafic égal que le coût moyen. Cela peut s'interpréter en pratique par le fait que le coût marginal, tant que la saturation n'est pas atteinte, est très au-dessous du coût moyen. Lorsque la saturation est atteinte, ce qui se présente dans le cas français pour un passage de 250.000 à 300.000



essieux par an, le coût s'élève brutalement. Comme le transport routier est en expansion assez rapide (5% par an), on sait qu'une saine politique de développement des infrastructures consiste à ne faire les extensions nécessaires que lorsque la demande qui les justifie peut effectivement payer ces extensions, ce qui, en pratique, conduirait à un coût marginal dont les variations en fonction du temps prendraient la forme de dents de scie. Ces irrégularités, à période de l'ordre d'une dizaine d'années pour le réseau moyen actuel, si elles devaient se répercuter dans les taxes ou péage, seraient en pratique intolérables et il vaudrait mieux accepter une péréquation des charges dans le temps et maintenir le coût constant. Pour cette raison encore le coût moyen défini ici à une utilité plus concrète que le coût marginal.

#### IV-22 - Application du coût moyen théorique au réseau des routes nationales

Nous avons alors, pour tester la validité de l'interprétation faite dans ce rapport des A.A.S.H.O. Tests, recherché la totalité des amortissements qui auraient dû avoir lieu pour l'ensemble du réseau des routes nationales en 1960, en les calculant sur la base des coûts moyens calculés ici et pour la circulation évaluée lors du recensement général de la même année. Nous avons ensuite comparé la totalité de ces amortissements à la totalité des dépenses d'entretien engagées par l'Etat pour la même année. Si cette année l'état d'entretien du réseau s'est maintenu; les deux chiffres doivent être voisins.

a/ le rapport de la Direction des Routes sur le recensement de 1960 donne en particulier le classement du réseau par importance du trafic total et largeur de la chaussée.

- Nous avons supposé que la proportion moyenne du trafic lourd (classes g à j, c'est-à-dire notamment les camions de plus de 3 T. de charge utile), soit 12% du nombre des véhicules/km, se maintenait dans la ventilation du réseau, citée ci-dessus.
  
- Nous avons également, faute de meilleures données, assimilé ce nombre de véhicules de plus de 3 T. de charge utile au nombre d'essieux de 10 T. Il s'agit d'une très grosse approximation qui demande à être améliorée avant toute utilisation pratique des résultats de coût qui suivent. Elle est cependant vraisemblable car si tous les véhicules de plus de 3T. n'ont pas d'essieux de 10 T., beaucoup en ont plusieurs et certains de plus lourds, donc d'effet plus sévère pour la chaussée. La notion d'essieux équivalents définie en IV-12 permettrait d'ailleurs de préciser beaucoup cette hypothèse, si cela était nécessaire.
  
- L'application de ces hypothèses conduit en 1960 pour l'ensemble des routes nationales en rase campagne à un amortissement total

pour entretien de la chaussée de :

930 M. F.

Le nombre de véhicules x km correspondant est de  $4,4.10^9$ , soit sensiblement en moyenne générale sur le réseau

0,21 F./véhicule lourd x km

Pour approcher l'ensemble des amortissements pour entretien de la chaussée de tout le réseau national, il faut compléter ces chiffres par les dépenses d'entretien en zone urbaine de ce réseau. En première approximation, cette correction peut être estimée proportionnellement à la longueur du réseau ce qui conduit à une augmentation de 5% des amortissements théoriques, qui sont ainsi portés à

980 M.F.

b/ Ces chiffres sont à comparer aux dépenses que l'Etat a réellement engagées en 1960 pour l'entretien du réseau national. La Commission des Comptes des Transports indique à ce sujet dans son 5ème Rapport Général que les dépenses d'investissement et de fonctionnement de l'Etat pour les infrastructures routières valent :

- fonctionnement	645 M.F.
- routes et ponts	293 M.F.
- F.S.I.R.	233 M.F.
	-----
TOTAL ...	991 M.F.

Une part de ces dépenses correspond à des travaux neufs de construction de plateforme et d'ouvrages d'art. Elle peut être estimée à une valeur de l'ordre de la contribution du F.S.I.R., ce qui ferait ressortir les dépenses d'entretien à 750 M. ou 800 M.F. Par contre, pour comparer complètement ces valeurs aux chiffres théoriques, il y aurait lieu de les compléter par les charges sur les valeurs immobilisées, ce qui est difficile à apprécier.

Nous ne cherchons dans le rapprochement des amortissements théoriques et des dépenses réelles qu'une confirmation globale et grossière du bien fondé de l'utilisation qui a été faite des résultats des A.A.S.H.O. Test. C'est pourquoi nous estimons le rapprochement des chiffres satisfaisant malgré l'imprécision qui frappe chacun d'eux et le nombre et l'importance des approximations faites en cours de calcul, en particulier pour estimer la correspondance entre le volume de circulation et le nombre d'essieux lourds.

Nous pensons qu'il est, dans ces conditions, intéressant de poursuivre l'application des résultats théoriques au cas du réseau routier national.

.....

IV-23 - Variation du coût d'entretien en fonction de l'importance de la circulation. Rapport avec le coût total

L'application des valeurs calculées pour le coût d'entretien, en fonction de l'importance de la circulation, faite ci-dessus en 2°/ a) pour l'ensemble du réseau national, peut être conduite également par catégorie de routes (définies suivant la largeur) sur ce même réseau et sur le trafic moyen que supporte chaque classe de routes. Les résultats de cette analyse sont portés sur les graphiques 7 et 8.

Il apparaît nettement pour les dépenses de construction et d'entretien de la chaussée un phénomène de rendement croissant du moins tant que le niveau de circulation lourde reste inférieur à 800 ou 900 véh./jour. Ce phénomène se traduit en particulier par le fait que si le coût moyen du véhicule km est en moyenne de 0,21 F. pour l'ensemble du réseau, il n'est que de 0,10 F. pour ses parties les plus chargées.

Ce phénomène doit s'atténuer cependant lorsqu'on calculera l'amortissement de toutes les dépenses parce que c'est précisément seulement pour les parties les plus chargées du réseau qu'il y aura lieu de prendre des dépenses d'extension d'infrastructures (donc de construction de chaussées et d'ouvrages d'art). L'estimation de ces dépenses représente la deuxième partie de l'étude dont ce rapport est le début et qui vise à définir le coût réel pour la collectivité de la circulation routière et de son développement.

Sans vouloir préjuger les conclusions de l'étude du coût de construction des plateformes et des ouvrages d'art, nous estimons que son ordre de grandeur au véhicule x km pourrait être de 0,2 à 0,3 F/véh. x km, qu'il faudrait ajouter à 0,1 F. correspondant à l'amortissement de la chaussée lorsque le trafic est important.

Ces chiffres, s'ils devaient être confirmés, seraient alors à rapprocher des taxes que les véhicules lourds payent sur le gas-oil par km (de l'ordre de 0,13F/km pour le camion de 10 T. de charge utile).

Cette comparaison inciterait alors à conclure que le transport routier ne semble pas payer la totalité des charges qu'il occasionne, bien que dans son ensemble la circulation routière paye plus à l'Etat que celui-ci ne dépense pour la construction et l'entretien des infrastructures, comme l'a montré la Commission des Comptes des Transports dans son Rapport déjà cité.

Cela voudrait dire, en particulier, que si dans leur ensemble les taxes sur les carburants couvrent avec excédents les dépenses routières, celles sur le gas-oil apparaissent cependant insuffisantes relativement à celles sur l'essence et même insuffisantes en valeur absolue. Une partie des charges du transport routier est supportée par la circulation des véhicules légers. L'existence de cette péréquation, si elle se confirmait, est contraire aux principes sur lesquels la politique des transports est de plus en plus volontiers fondée aujourd'hui.

Ces conclusions ne sont dans notre esprit que provisoires: elles appellent pour être retenues de nouvelles études qui les confirmeraient.

#### IV-3 - Conclusions

L'analyse des dépenses d'entretien a été faite ici sur la base des essais A.A.S.H.O. qui ont montré le rôle essentiel de la circulation lourde. L'étude faite conduit à proposer avec toutes les réserves dites, le coût d'entretien suivant la valeur de la circulation lourde. Il s'agit d'une partie de la deuxième étape de l'étude générale définie en I dont la conclusion devrait être le coût complet de chacune des circulations, analysé dans l'optique marginale et dans l'hypothèse générale de croissance du trafic. En d'autres termes, il s'agissait de calculer avant la lettre le coût de développement de la circulation routière.

Depuis l'époque où cette étude a été définie, divers événements ont modifié quelque peu le contexte et les conditions de déroulement; l'importance des travaux entrepris par ailleurs pour calculer les coûts de développement en atténue peut être l'intérêt propre. Dans la mesure cependant où des études nouvelles reprendraient le fil interrompu, il nous paraît utile de rappeler que les résultats de ce Rapport doivent, avant d'être utilisés, être précisés sur les points suivants :

- confirmation de la possibilité d'adapter les résultats A.A.S.H.O. au cas français,
- coût unitaire de la construction et de l'entretien des chaussées,
- correspondance entre circulation lourde et nombre d'essieux lourds pour éclairer la correspondance entre dépenses d'entretien et véhicules x km ou tonne x km.

Pour aboutir au coût complet de la circulation, il y aurait lieu :

.....

- de compléter les dépenses pour la prise en compte de l'établissement de la plateforme,
- de préciser les liens entre le débit et la largeur des chaussées ainsi que les effets de la circulation lourde sur le débit.

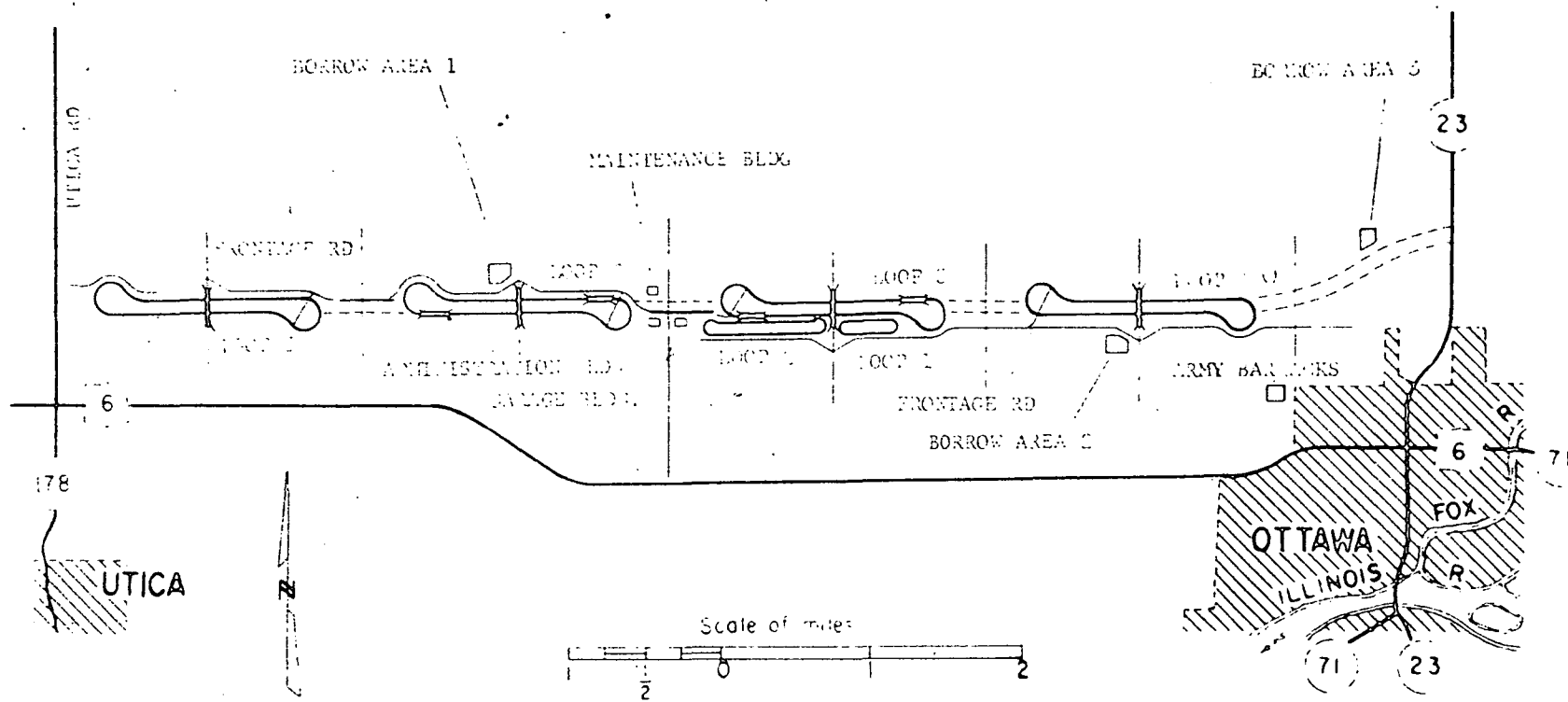
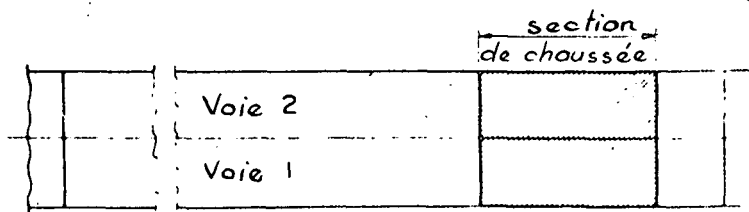
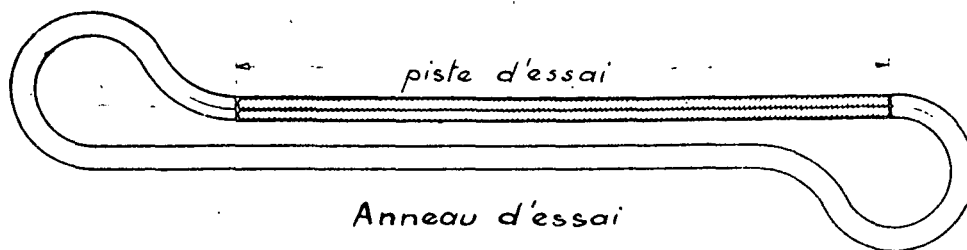
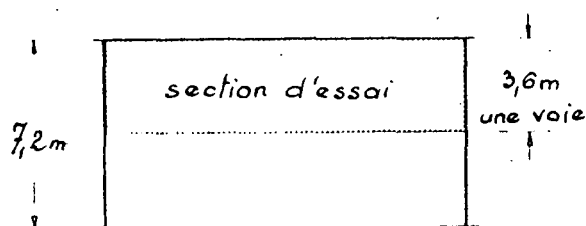


Figure 1 Carte de l'AASHO Road Test

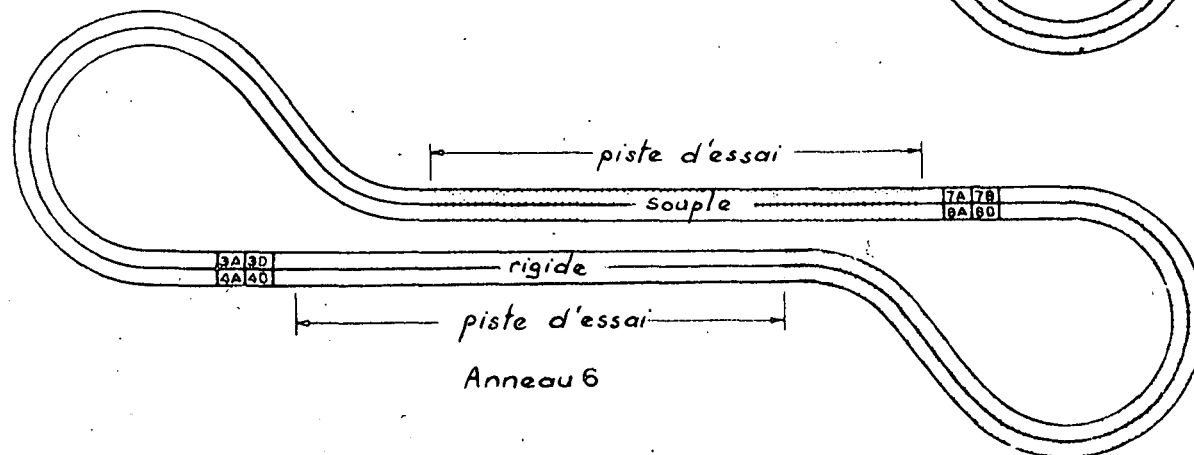
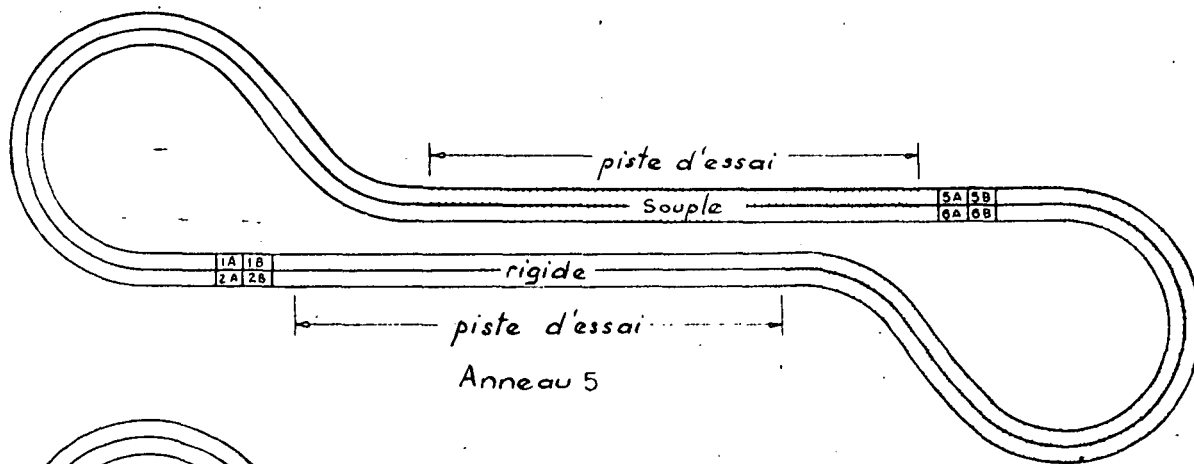


Piste d'essai



Section de chaussée

Figure 2 Anneau d'essai.



Emplacement des ponts

# COUPE TYPE DE LA CHAUSSEE SOUPLE DE AASHO TEST

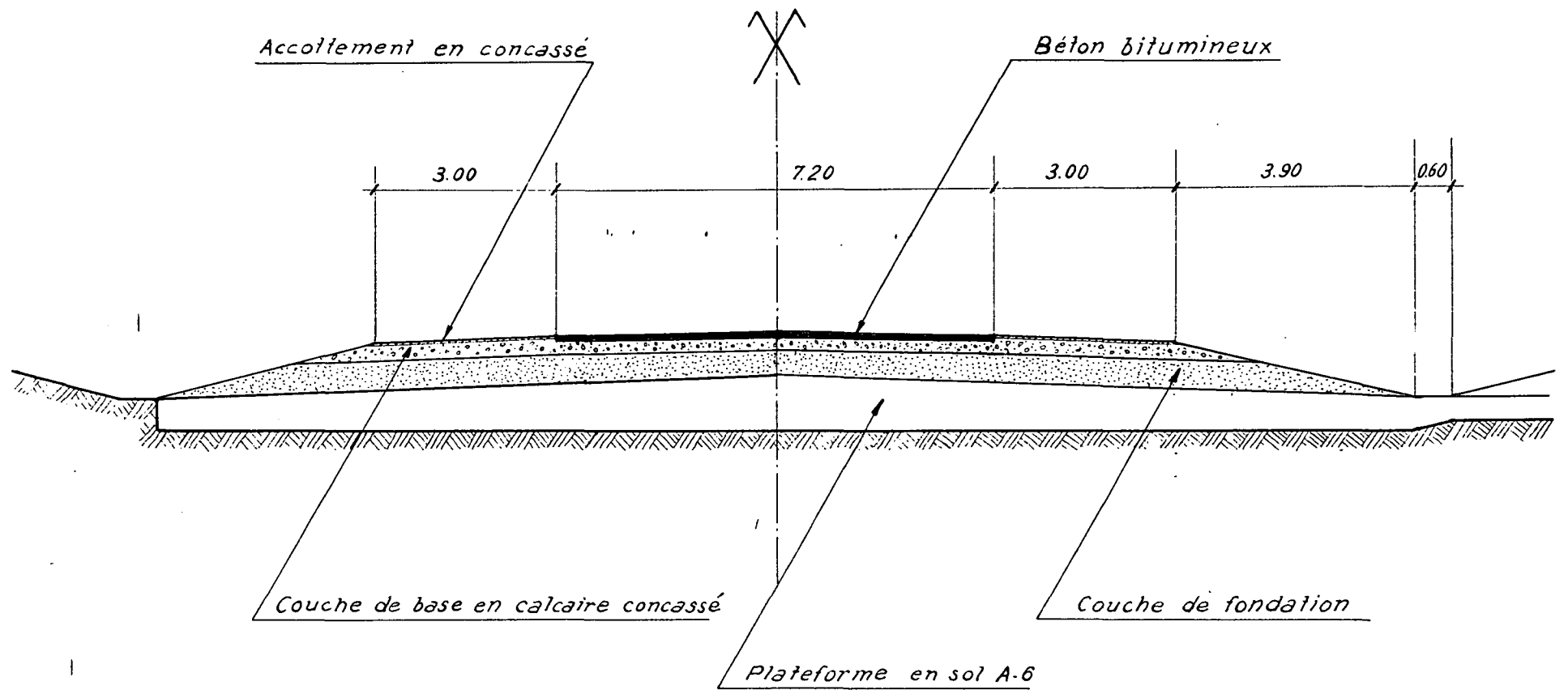


Fig. 3



Poids en kips

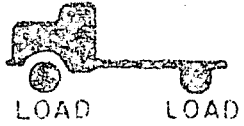

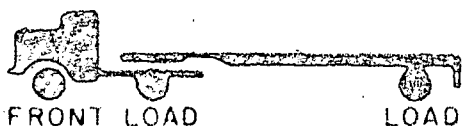
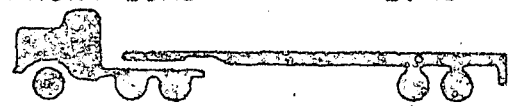
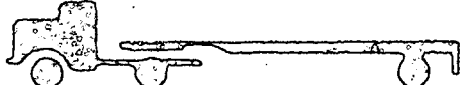
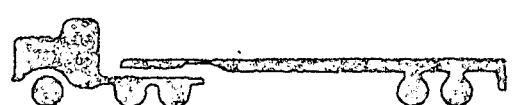
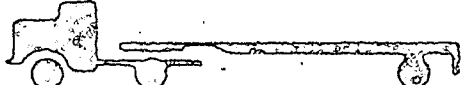
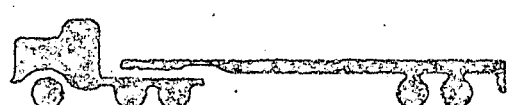
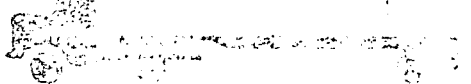
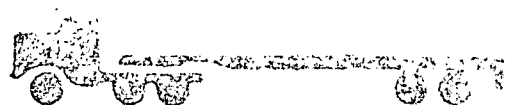
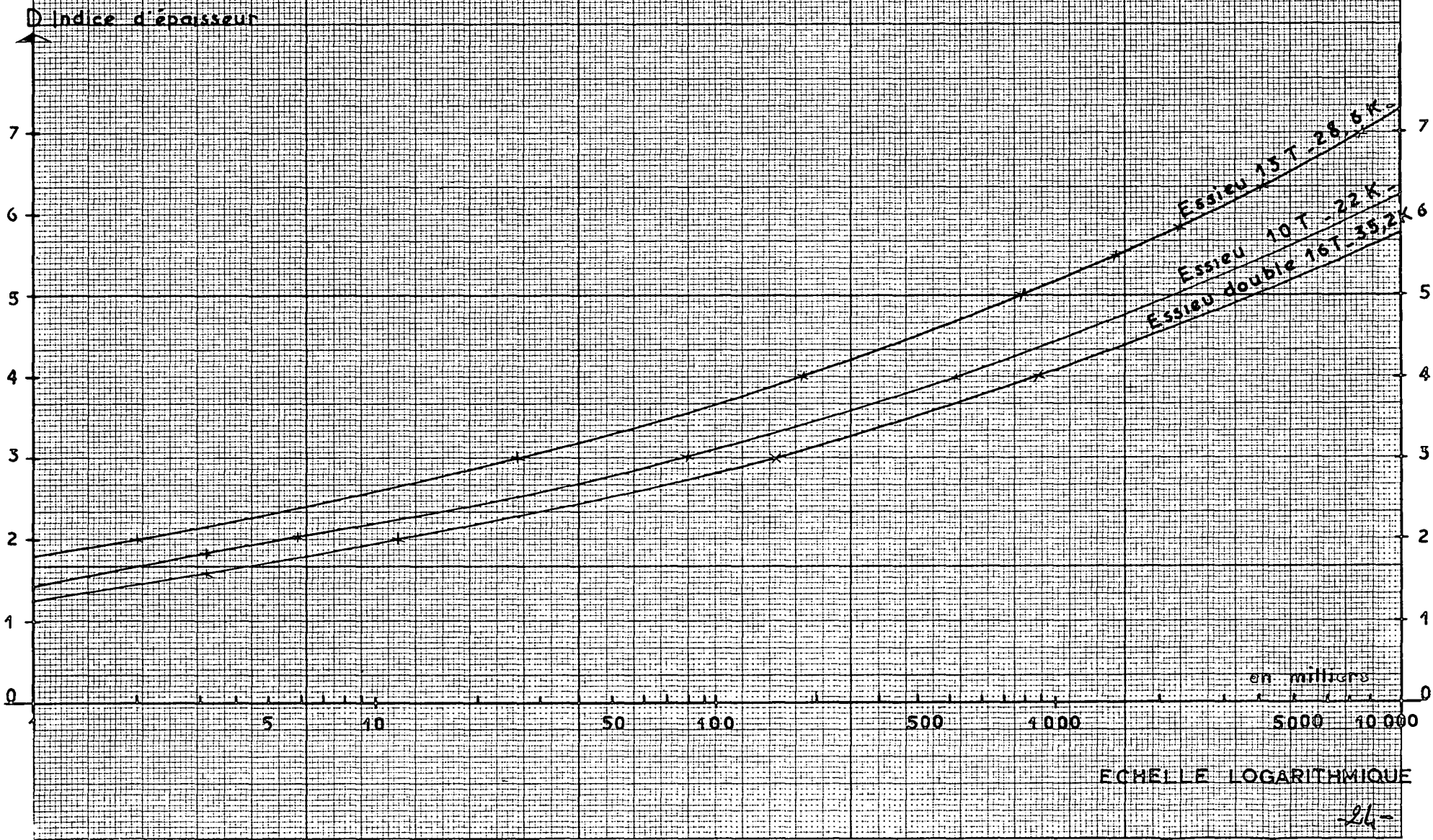
Anneau	Voie		Essieu directeur (Front) Axle	Essieu porteur (Load) Axle	Poids total
②	①		2	2	4
	②		2	6	8
③	①		4	12	28
	②		6	24	54
④	①		6	18	42
	②		9	32	73
⑤	①		6	22.4	51
	②		9	40	89
⑥	①		6	22.4	51
	②		9	48	101

Figure 4. Véhicules types.

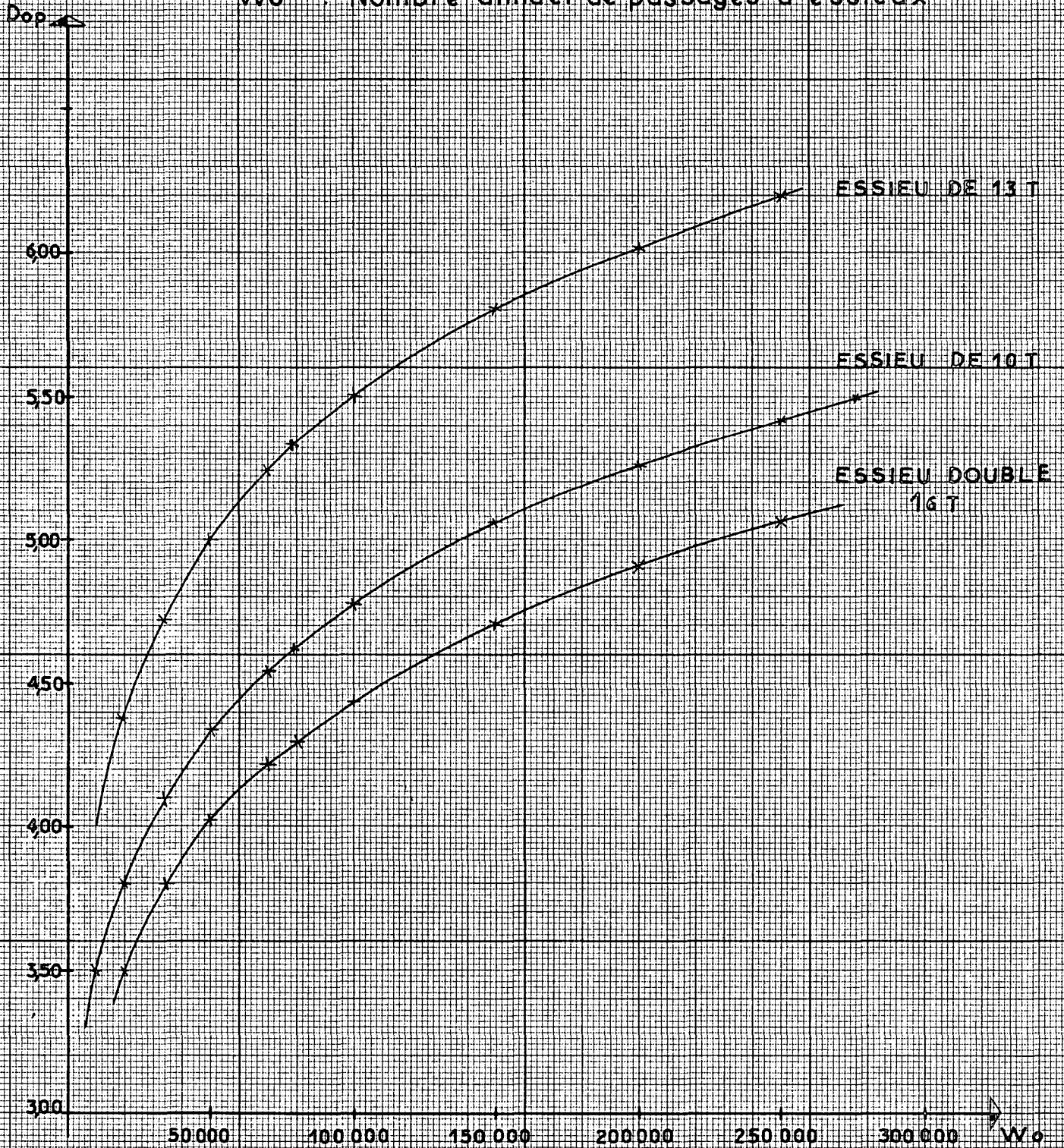
1 kip : 1000 livres : 453 kgs.

INDICE D'ÉPAISSEUR NÉCESSAIRE POUR QUE  
L'INDICE DE SERVICE  $P=2,5$  SOIT ATTEINT  
APRÈS W APPLICATIONS D'ESSIEUX DE TYPE DONNÉS



Dop : Indice d'épaisseur optimum

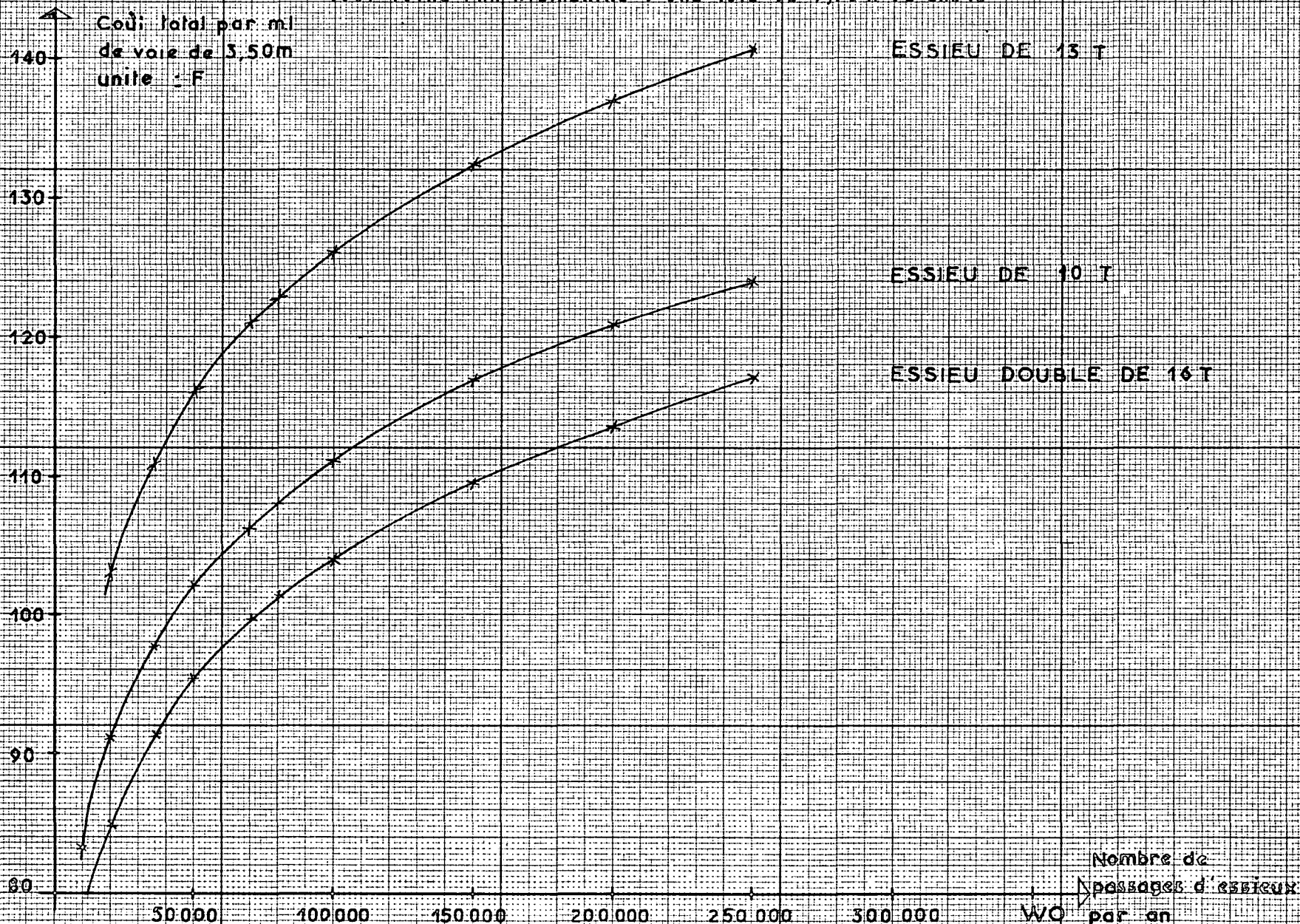
Wo : Nombre annuel de passages d'essieux



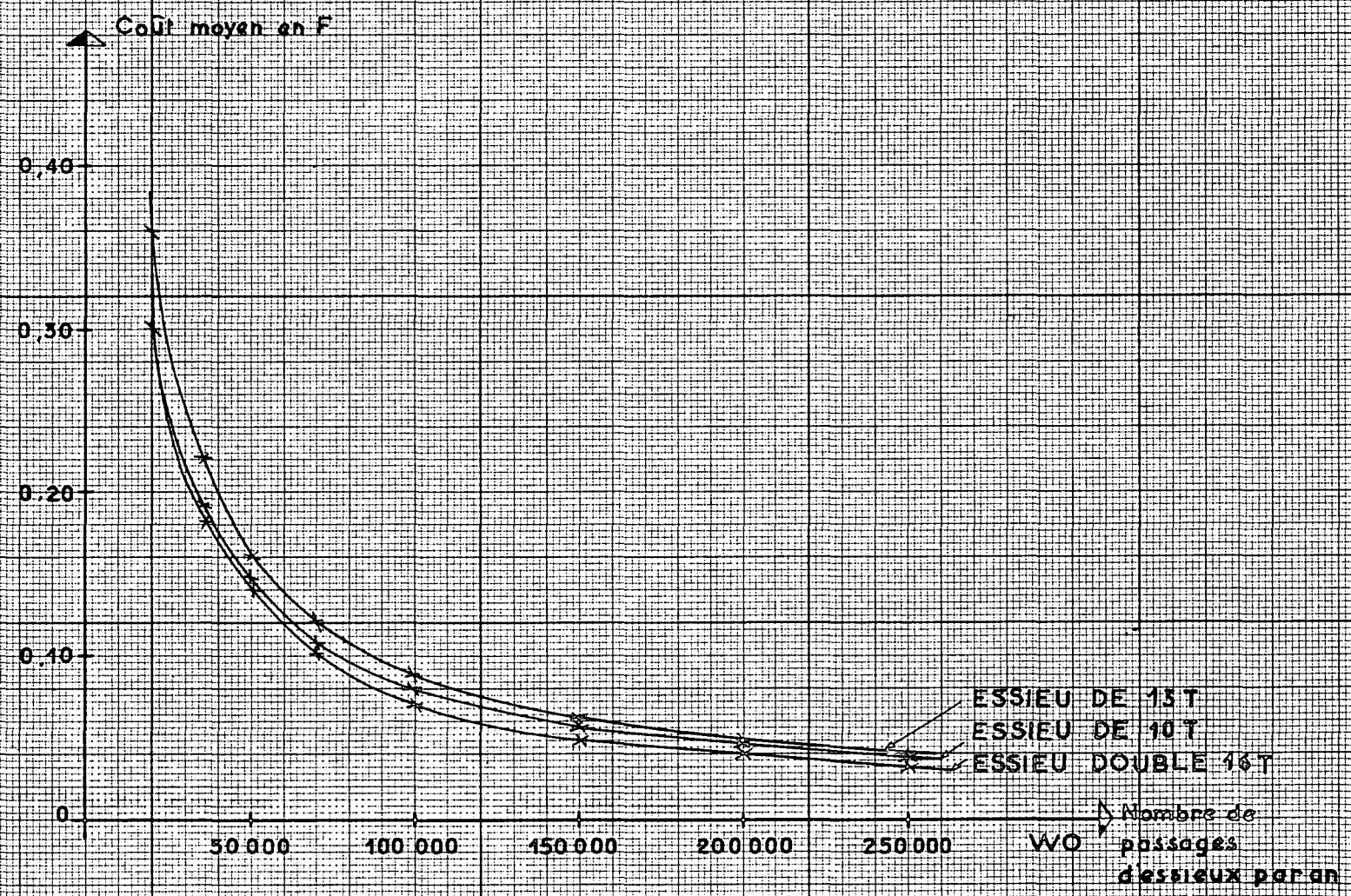
# COUT TOTAL EN FONCTION DU TRAFIC

Graphique N°3

CONSTRUCTION DE LA CHAUSSEE ET ENTRETIEN  
 COUT TOTAL PAR M LINEAIRE D'UNE VOIE DE 3,50 M DE LARGE

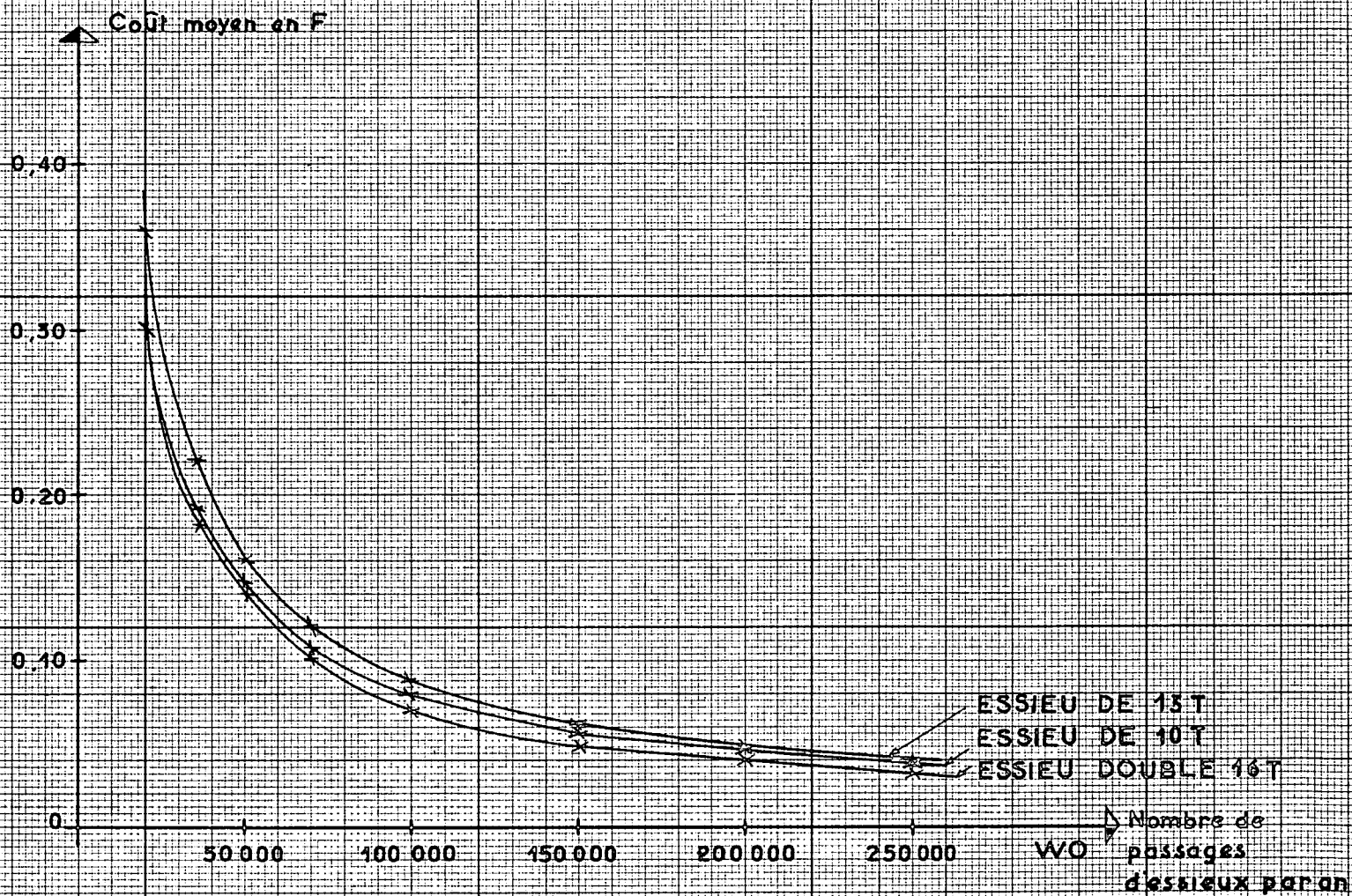


# COÛT MOYEN DE L'ESSIEU x KM EN FONCTION DU TRAFIC



27

## COUT MOYEN DE L'ESSIEU x KM EN FONCTION DU TRAFIC



# COÛT MARGINAL DE L'ESSIEU x KM EN FONCTION DU TRAFIC

