

4. Universalité de la méthode décrite

Les nombreuses objections qui peuvent être formulées contre l'application généralisée des résultats de l'AASHO Road Test ont été exposées en détail dans les ouvrages cités (renvois 1 et 2, page 7). L'objection principale porte sur le fait que les résultats sont valables pour un sous-sol déterminé, pour certains types de chaussées et de matériaux, pour une incidence précise du climat sur ces chaussées et pour un trafic très particulier puisqu'il a vu se succéder, en peu de temps, 1,1 million de passages de véhicules du même type circulant à des intervalles quasi constants, à des vitesses à peine différentes et presque invariablement au même endroit des chaussées. Strictement parlant, tous les résultats sont par conséquent valables pour cette seule situation. L'équipe scientifique de l'"Highway Research Board" se sera sans aucun doute rendu compte de cet état de fait avant d'entamer ces essais onéreux (30 millions de dollars) puisque cette réserve est expressément formulée dans les différents rapports. Elle a néanmoins osé (et dû) entreprendre ces essais parce qu'on n'avait jamais entrepris auparavant d'essais semblables avec un tel luxe de précautions et à une échelle aussi proche de la réalité (avec les situations complexes qui se présentent dans le domaine de la construction routière, une réduction d'échelle pose des problèmes correspondants). C'est ainsi que l'on a été contraint d'opter (dans le cadre des possibilités données) pour un trafic composé de charges par essieu identiques plutôt que pour un trafic hétérogène parce que les relations seraient devenues sinon beaucoup plus complexes. A un stade ultérieur (étude dite satellite), il serait possible de comparer les résultats d'un trafic hétérogène parcourant des routes normales (au sujet desquelles on doit disposer de données suffisantes concernant la structure du trafic) avec les résultats AASHO. Par ailleurs, le choix qui a été opéré en ce qui concerne le sous-sol et le climat ainsi que le mode et la technique de construction des chaussées était représentatif d'un état de fait relativement défavorable et assez fréquent dans le pays, d'une part, et correspondait aux normes et habitudes du moment, d'autre

part. Pour pouvoir exécuter les essais dans un délai raisonnable, il a bien fallu choisir une structure déterminée d'application de charges qui, en de nombreux points, ne diffère d'ailleurs guère de ce qu'on peut voir en trafic intensif.

Diverses objections de détail, mais importantes quand même, peuvent encore être formulées à l'encontre des essais AASHO, à savoir le mode de pondération des applications de charges, la nature des matériaux de construction utilisés (pour les couches de base notamment) dans les sections d'essai asphaltées, ce qui peut expliquer la part des destructions dues au "dégel superficiel", et, enfin, l'insuffisance des mesures physiques et de l'interprétation des phénomènes constatés.

Il reste, par ailleurs, qu'il faut à chaque application des résultats des essais AASHO à des fins de dimensionnement, se demander si elle est justifiée, par exemple, si la situation à laquelle on veut appliquer ces résultats correspond ^{suffisamment} à la situation AASHO et si ce qui a été trouvé est suffisamment plausible au regard de résultats obtenus d'une façon totalement différente (p. ex.: considérations théoriques ou autres essais pratiques). Les formules et graphiques AASHO ne doivent donc pas être considérés comme une véritable méthode de dimensionnement au sens de méthode de calcul. Ils ne sont ni plus ni moins qu'une formulation statistico-mathématique générale des résultats des essais. Si l'on calcule d'après ces graphiques que pour un nombre donné d'applications n de la charge par roue P , la chaussée en béton doit au moins avoir l'épaisseur D cm, cette conclusion est valable, dans les limites de confiance assez larges décrites précédemment, pour l'ensemble des conditions AASHO. Ce résultat n'est applicable que si l'on estime que les conditions dans lesquelles on travaille et les chaussées qu'on construit correspondent "suffisamment" à celles de l'AASHO. Si l'on estime que la nature du sous-sol, le climat et la construction diffèrent, on peut tenter de déterminer les corrections correspondantes. Plusieurs solutions de cette nature ont d'ailleurs été proposées et mises en pratique ; le rapport AASHO contient d'ailleurs des suggestions en ce sens. Pour la construction même, il faudra exprimer toutes les différences dans la valeur de

l'indice d'épaisseur $D = \sum c_i h_i$, les corrections relatives à la nature du sol pouvant être déterminées à l'aide des paramètres habituellement utilisés à cette fin (p. ex. valeur C.B.R. et modules d'élasticité). C'est ce qui a été d'ailleurs fait par la Commission d'études AASHO (1) ainsi que par l'"Asphalt Institute" et (en partie) par la "Shell" dans leurs méthodes de calcul. La méthode Shell recourt également aux résultats de la théorie de l'élasticité qui se fonde elle-même, en partie, sur une interprétation des résultats AASHO.

Il va de soi que les résultats de cette véritable méthode de calcul correspondent aussi bien que possible avec ceux de méthodes antérieures (telles que les méthodes C.B.R. et la méthode de McLeod).

Toutes ces méthodes de calcul utilisent les formules d'équivalence de charge par essieu trouvées par les essais AASHO telles qu'elles (Liddle, Shell) ou légèrement modifiées (Asphalt Institute). Dans l'ensemble, ces formules d'équivalence de charge par essieu ne sont en soi d'ailleurs absolument pas neuves. Diverses études effectuées au cours des vingt dernières années ont déjà permis de proposer plusieurs facteurs d'équivalence (f) (cf. figures 5 et 6 ; si la valeur de ces différents facteurs diffère quelque peu, le "trend" ne diffère guère. On peut donc affirmer que les équivalences de charge par essieu sur la base de P^4 , trouvées dans les essais AASHO, correspondent de façon satisfaisante avec les facteurs déterminés sur la base d'autres études. Il est toutefois utile de constater que les facteurs d'équivalence déterminés grâce aux essais AASHO ne se fondent que sur un nombre limité de données.

En effet, il faut être conscient du fait que seule la partie en traits pleins des courbes de la figure 1 est le reflet de mesures réellement effectuées ; aucune coupe horizontale ne recoupe alors toutes les

(1) W.J. Liddle. Proc. Int. Conf. Strcut. Design Asph. Pav. 1962, 42.

courbes des mesures AASHO. Etant donné que le nombre de sections souples qui ont "cédé" pendant l'essai AASHO a atteint un niveau aussi élevé, ces lignes sont en grande partie connues. Sur les sections rigides, les résultats ne peuvent guère être estimés satisfaisants dans ce domaine. La zone d'extrapolation ne concrétise pas des observations, mais représente exclusivement l'extrapolation de formules représentatives de la zone couverte par les mesures ; il n'est pas sûr qu'une telle procédure soit permise. Il n'empêche que toutes les méthodes de calcul utilisant les résultats AASHO procèdent à une telle extrapolation. Cela constitue, par ailleurs, une licence que se sont autorisées toutes les méthodes antérieures de dimensionnement.

Le paragraphe 2 décrivait une méthode de calcul d'une clé de répartition des coûts par catégorie de charge par essieu utilisable pour toutes les formules de dimensionnement. Il est évidemment fort souhaitable que cette formule donne l'épaisseur comme fonction de P et de n (q). Plusieurs anciennes méthodes de dimensionnement ne donnaient parfois D que comme fonction de P , avec une correction graphique éventuelle pour des catégories globales de trafic ("trafic lourd", etc.). D'autres méthodes, par contre, incorporaient déjà des équivalences de charge par essieu (méthodes EWL) pour le trafic hétérogène, ce qui les rend utilisables en principe, ou des graphiques de la forme générale $D = \text{fonction}(P \text{ et } n)$ pour diverses charges par roue. Aucune de ces méthodes ne donne toutefois une base valable pour la détermination du stade final de l'aptitude au service (niveau nécessitant la reconstruction) qui, dans la méthode AASHO, se fonde sur la valeur de p . La procédure est identique pour toutes les méthodes de dimensionnement $D = \text{fonction}(P \text{ et } n)$. On peut calculer ou déterminer graphiquement les épaisseurs nécessaires pour diverses catégories de trafic P_1 et n_1 , P_2 et n_2 , etc. et déterminer par les méthodes A1 ou A2. Si l'on dispose d'une méthode de dimensionnement qui recourt à une formule ou à un graphique d'équivalence de charge par essieu, il est également possible d'appliquer la méthode B qui se fonde entièrement sur la structure de la chaussée nécessaire pour le trafic hétérogène.

Il est évident que l'utilisation de ces méthodes de calcul donnera des résultats qui ne différeront pas essentiellement du résultat obtenu avec la "méthode de dimensionnement" AASHO.

Toutefois, on a souvent l'occasion de déterminer également les résultats dans des conditions de climat et de sous-sol totalement différentes.

Nous avons, quant à nous, appliqué la clé de répartition A1 à la méthode de calcul de Kerkhoven et Dormon à des constructions qui correspondraient à celles de l'AASHO sur le plan du sous-sol et des caractéristiques de charge. La clé de répartition ainsi obtenue pour le trafic est décrite au paragraphe 2.4.2.; elle est de 1; 4,3 : 14,1 : 53,5 : 88,5 par application de charges ce qui ne diffère guère du résultat qui y est mentionné.

L'application de la méthode B est exclue dans ce cas parce que cette formule de dimensionnement ne comprend pas de charge par roue équivalente, mais une simple relation $D = \text{fonction}(P, n)$.

Deux raisons expliquent pourquoi la clé de répartition est déterminée, dans le chapitre 2, sur la base des graphiques AASHO qui, comme il a déjà été dit, ne sont pas des formules générales de calcul. La première de ces raisons réside dans le fait que ce graphique est beaucoup plus sélectif que des formules "générales" de dimensionnement qui mettent en rapport diverses relations globales. La formule $D - \text{fonction}(N_{eq} 4t)$ que nous utilisons et la formule d'équivalence de charge par essieu qui s'y rapporte spécialement n'ont été déterminées pour aucune chaussée avec la même précision, permise par les expériences en vraie grandeur, que dans l'essai AASHO.

La simplicité de la formule choisie présente en outre le grand avantage de permettre la transcription simple des clés de répartition des coûts en formules permettant d'examiner divers groupes de coûts de façon simple.

On n'exclut pas qu'il est également possible d'effectuer les mêmes calculs (dans une forme cependant moins simple) sur la base des graphiques AASHO ou des formules AASHO "plus précises" qui ont déjà ou sont encore publiées. Il est utile de souligner à ce propos que pour des chaussées souples plus modernes (les pistes d'essai auxiliaires), on connaît également des graphiques de dimensionnement pour les conditions AASHO de sorte que la méthode peut également être utilisée dans ce cas.

En outre, la méthode de répartition élaborée au paragraphe 2 se fonde entièrement sur une structure moyenne (sur le plan de la répartition de P et q) dans l'ensemble du pays, structure appliquée à une chaussée (hypothétique) projetée pour ce même trafic. Il est donc possible de formuler certaines hypothèses quand aux conditions accessoires ; il est supposé que dans ce cas, ces conditions accessoires correspondent à celles de l'AASHO.

Le calcul d'une clé de répartition des coûts sur la base de diverses méthodes de calcul n'aura en règle générale pas la grande simplicité à laquelle avait pu atteindre la méthode décrite au paragraphe 2 en remplaçant n par q dans les diverses relations. En conséquence, D doit se calculer à partir de P et n, ce qui implique que la durée de vie n'est pas éliminée. Le résultat sera donc que les clés de répartition des coûts dépendront (en général dans une faible mesure) de la durée de service.

Pour les calculs relatifs à la répartition des coûts de l'entretien conditionné par le dimensionnement, ceci aura pour conséquence que les clés permettant d'effectuer cette répartition différeront légèrement de la clé de répartition des coûts d'une construction nouvelle. Il est évidemment possible de considérer les valeurs de n_1 , n_2 , etc. comme une moyenne totale pour l'ensemble du réseau routier de longueur l prévu pour une durée de service de m années, auquel cas il est possible de les calculer par la formule $A_1 \cdot B_1 \cdot m/l$, $A_1 \cdot B_2 \cdot m/l$, etc. (cf. 2.5.1., où A et B sont des moyennes pour la durée de service totale).

Il est cependant possible d'effectuer des calculs plus réalistes pour des chaussées spécifiques (autoroutes primaires, voiries agricoles, etc.) en se fondant sur une structure théorique de n et de P sur ces routes (cf. 2.6.1.). Les calculs à effectuer pour une répartition des coûts de l'entretien conditionné par le dimensionnement se fondent entièrement sur un redimensionnement destiné exclusivement à prolonger la durée de service représentée par D' (fonction de n' et P)- D (fonction de n et P). En effet, ces méthodes (à l'exclusion de méthodes de calcul utilisant la notion d'indice de qualité introduite par l'essai AASHO) n'ont même pas de critères définissant la fin de la durée de service.

Il est donc possible de calculer de cette façon (brièvement décrite ci-dessus) des clés de répartition des coûts au moyen de méthodes permettant de calculer l'épaisseur de chaussées modernes.

5. Conclusion

Le présent rapport décrit comment il est possible de calculer des clés de répartition pour diverses catégories de charges par essieu à l'aide de méthodes permettant de calculer l'épaisseur des chaussées.

Nous avons réuni tous les éléments nécessaires à la formulation simple de la relation existant entre l'épaisseur, les charges par essieu et le nombre d'applications de ces charges qui a été élaborée sur la base des résultats des essais AASHO. Les calculs sont totalement identiques pour la construction et l'entretien de la chaussée, dans la mesure où les coûts sont conditionnés par le dimensionnement.

7417/VII/67-F (Annexe 2)
C/24-67

- Plan factoriel principal, relation entre la structure et le nombre d'applications de charges correspondant à $p = 2,5$
d'après les équations de l'Essai.

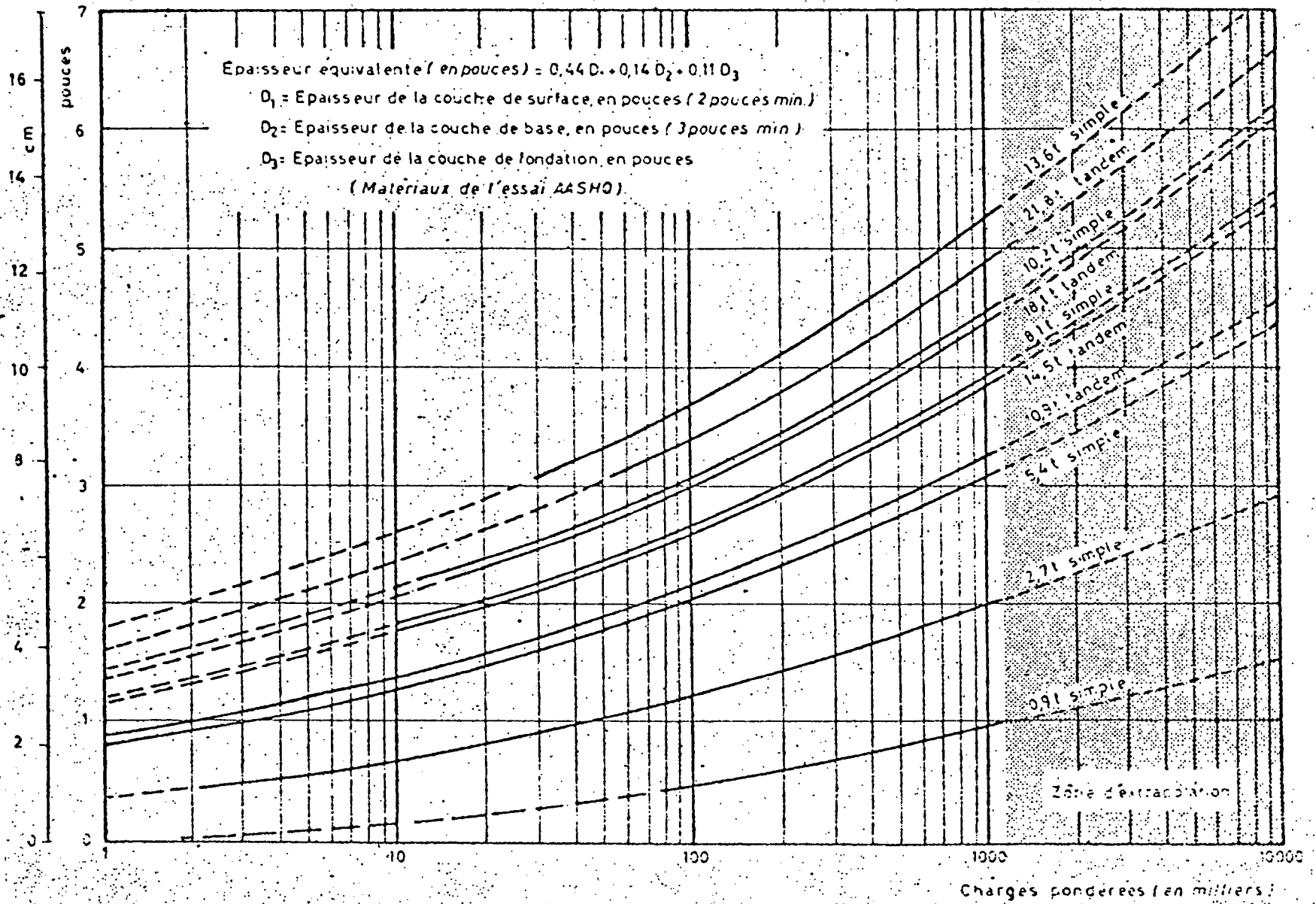
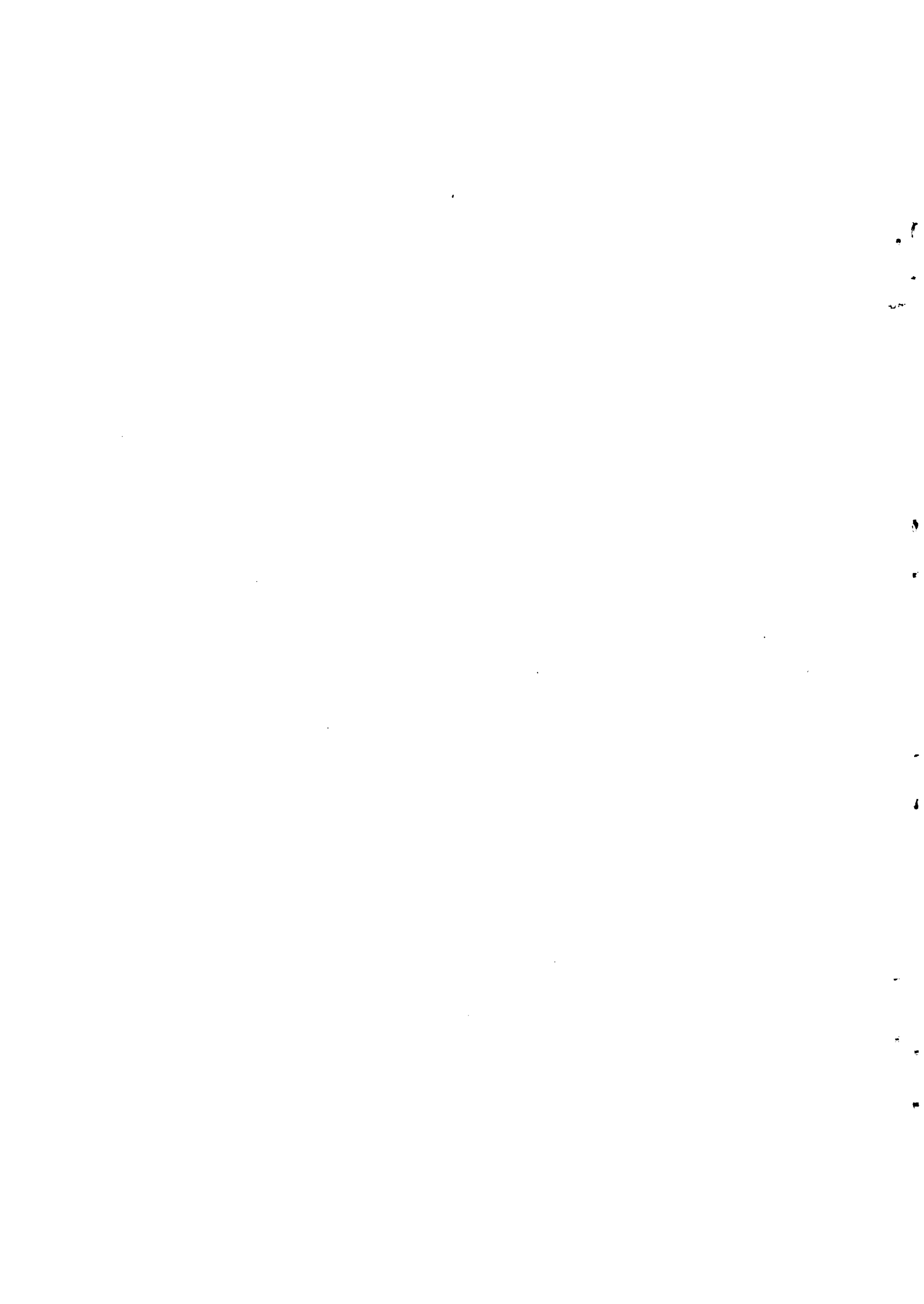
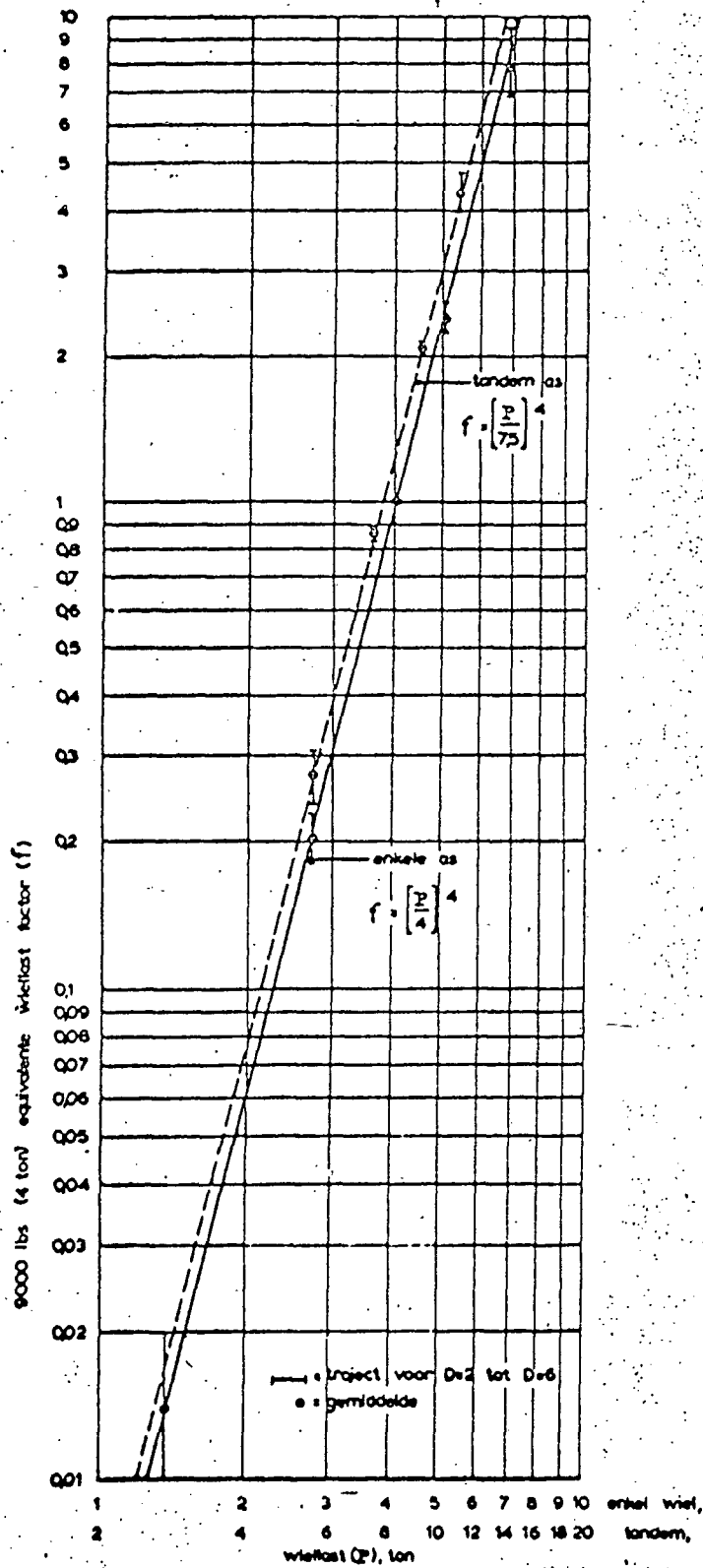


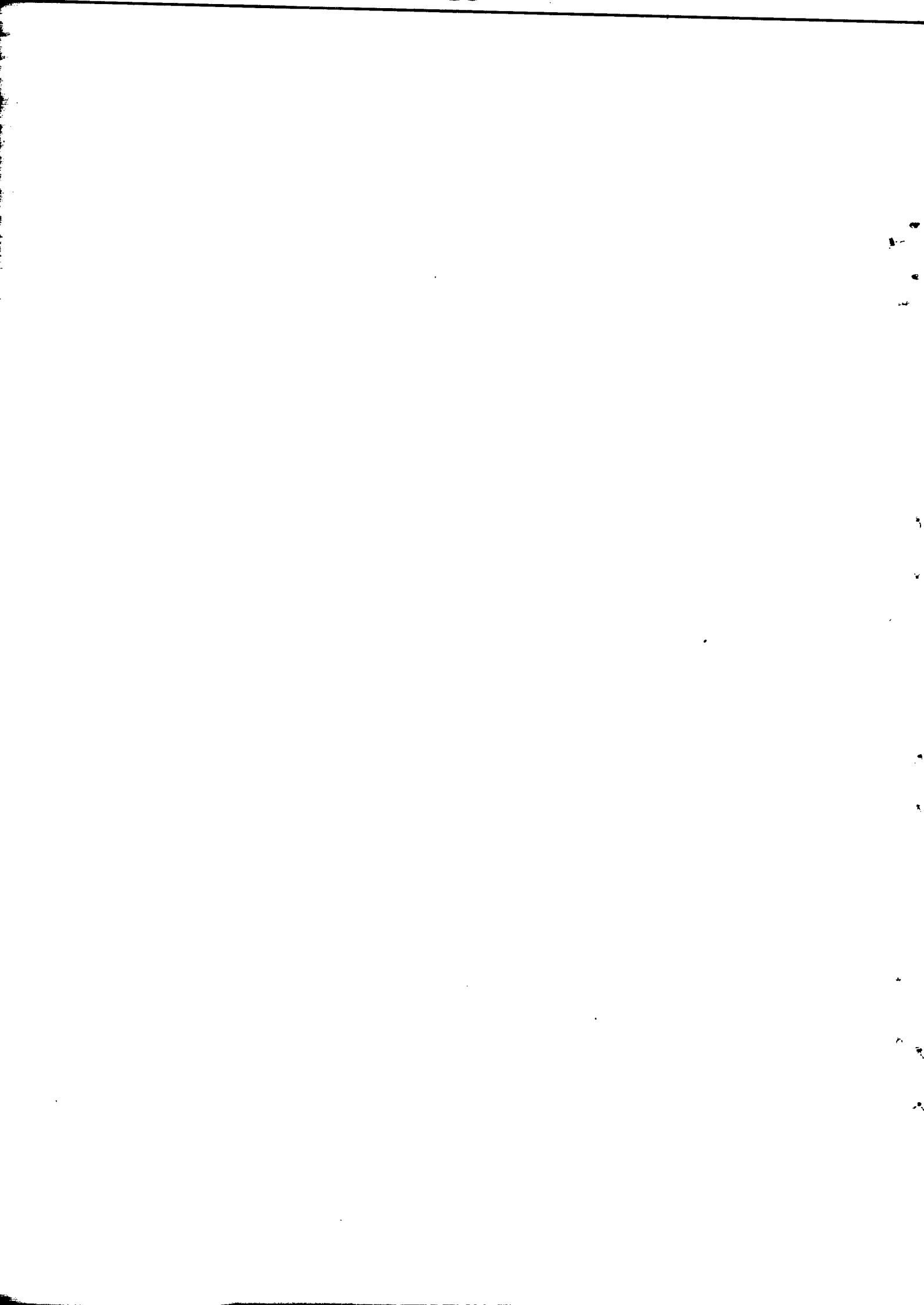
fig 1

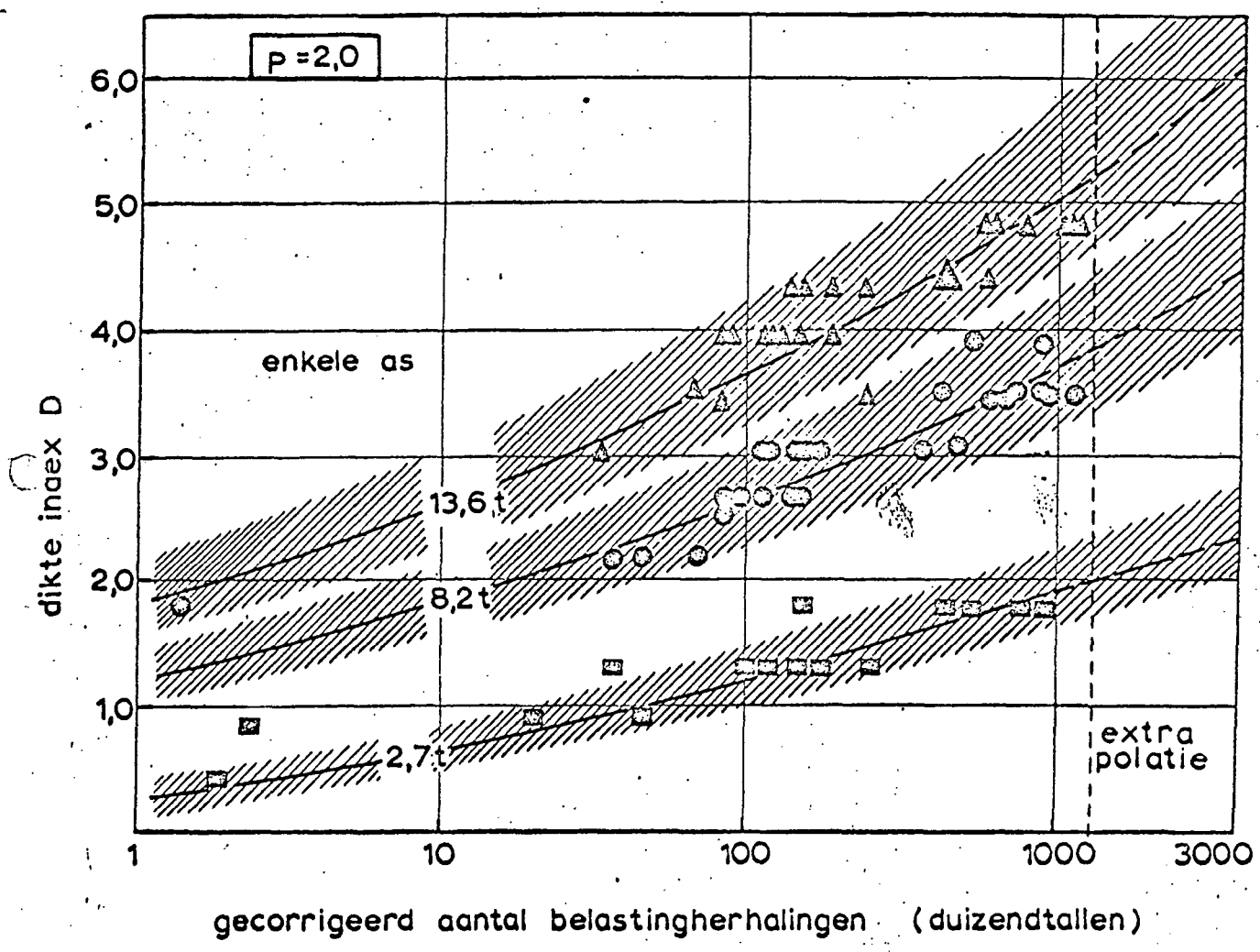




Verband tussen de 4 tons equivalente wielastfactor en de wielast.

fig 2

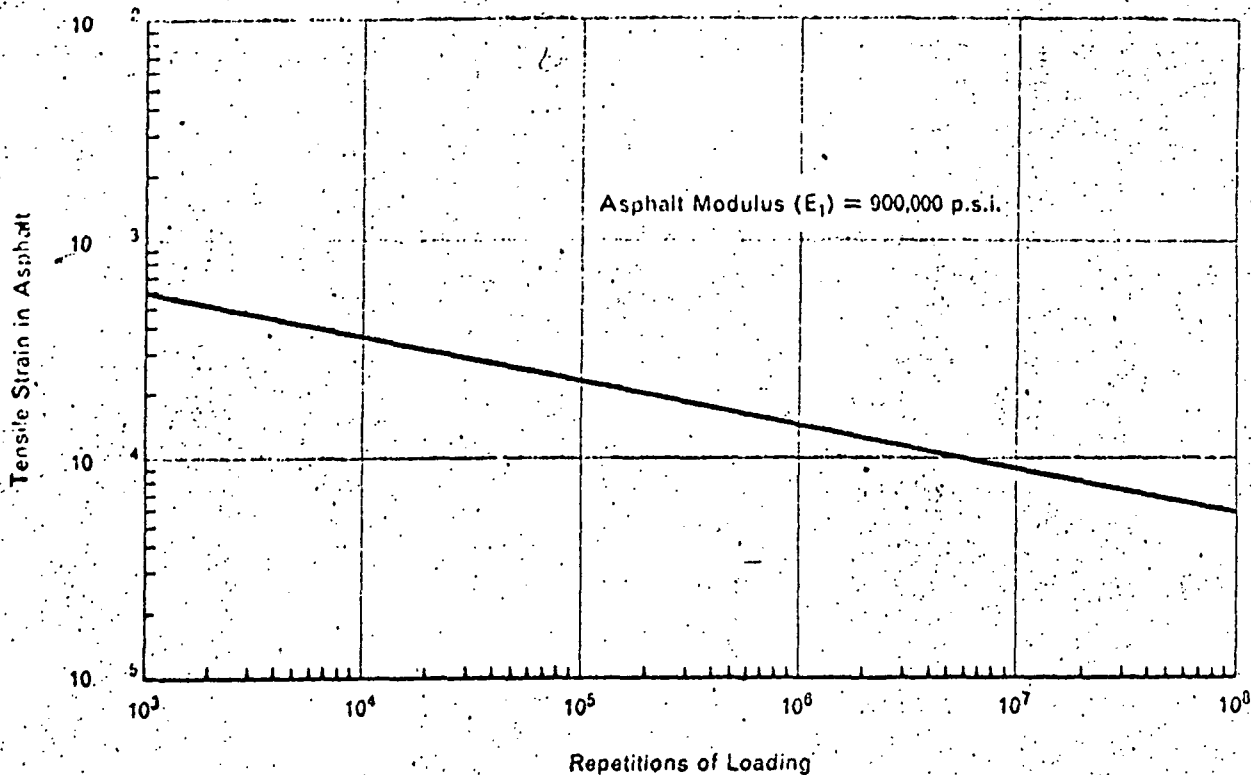




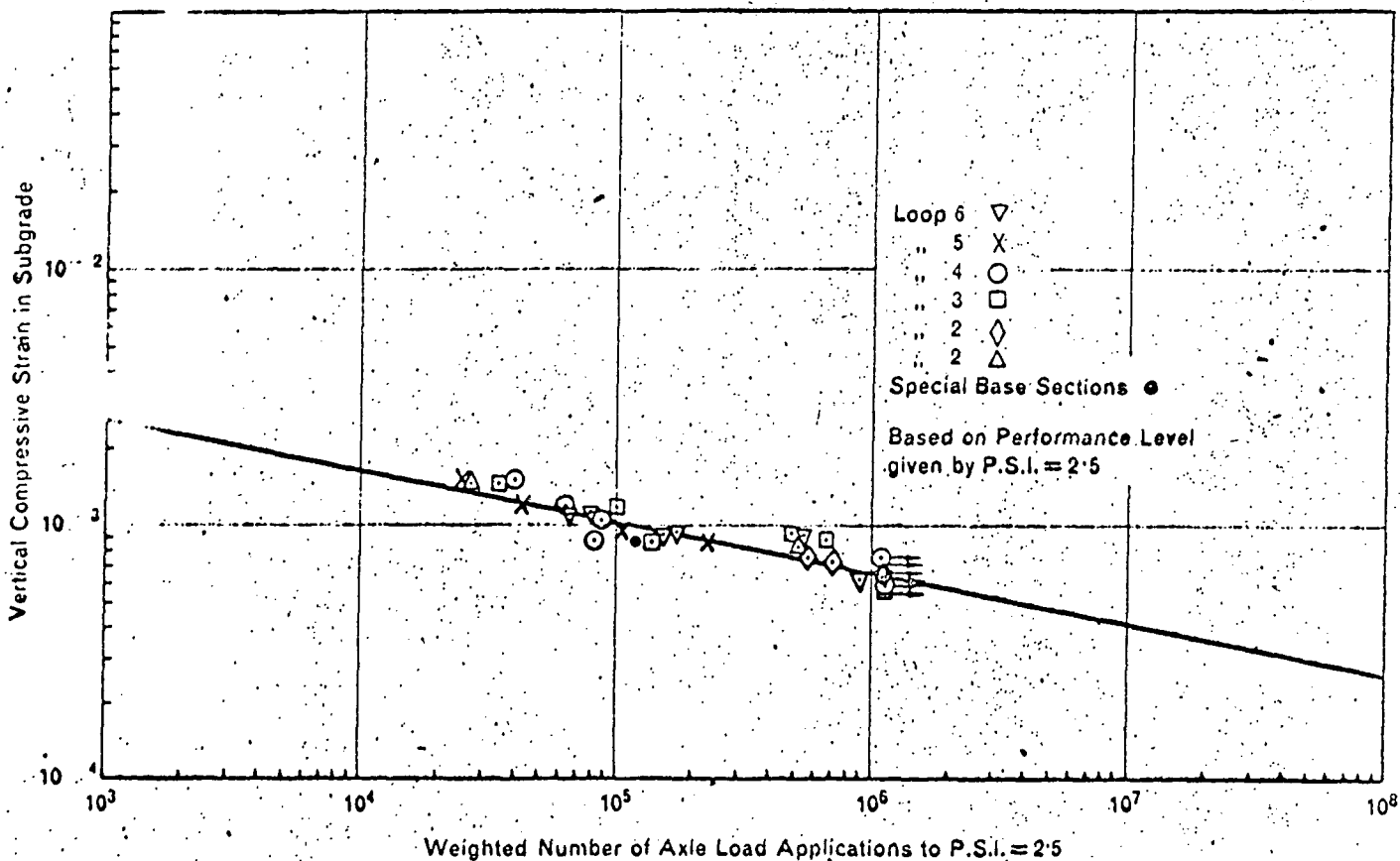
Minimale toegelaten grenzen voor het verband tussen D en n ,
 bij $p = 2,0$, voor drie aslasten.

fig. 3

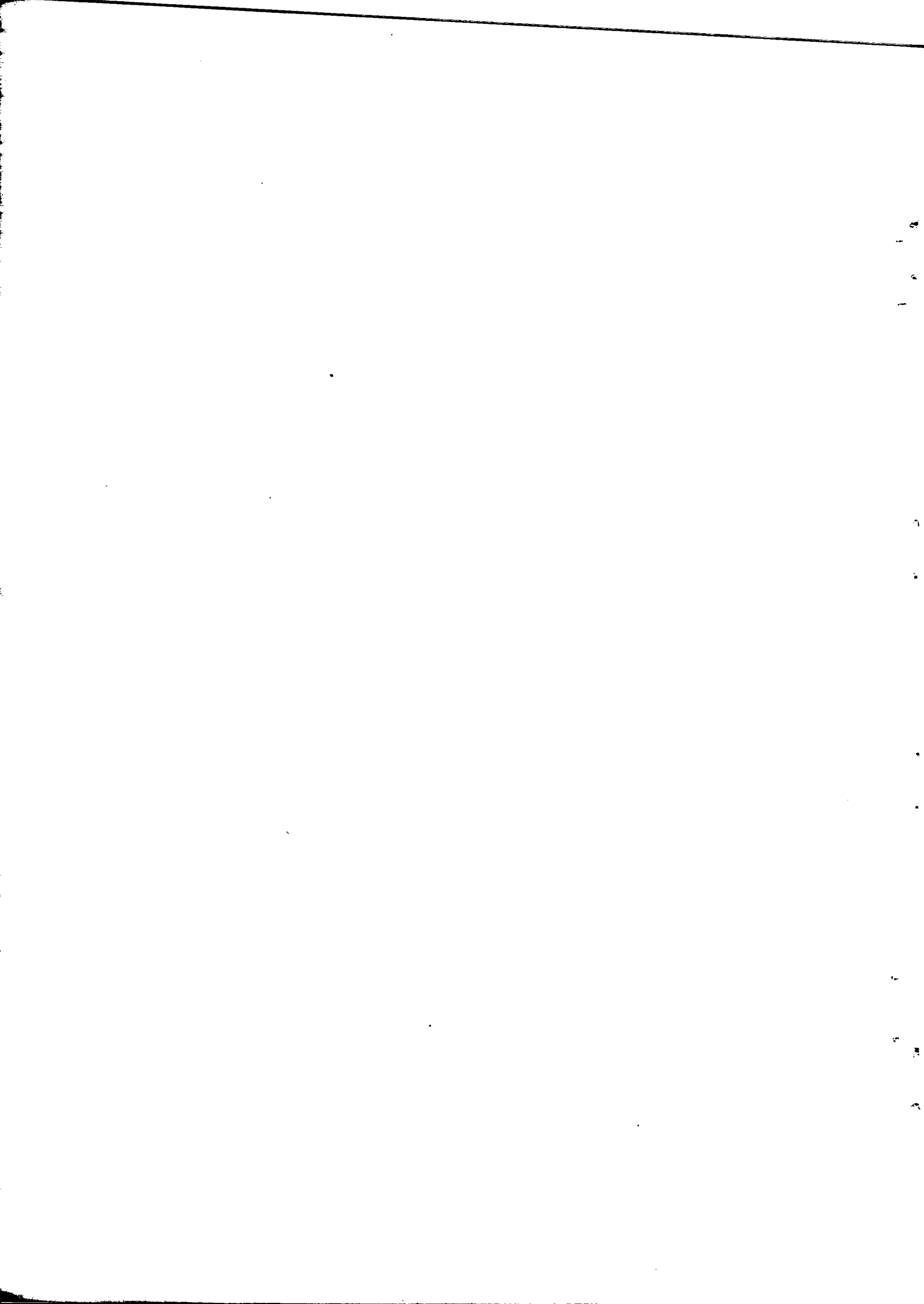


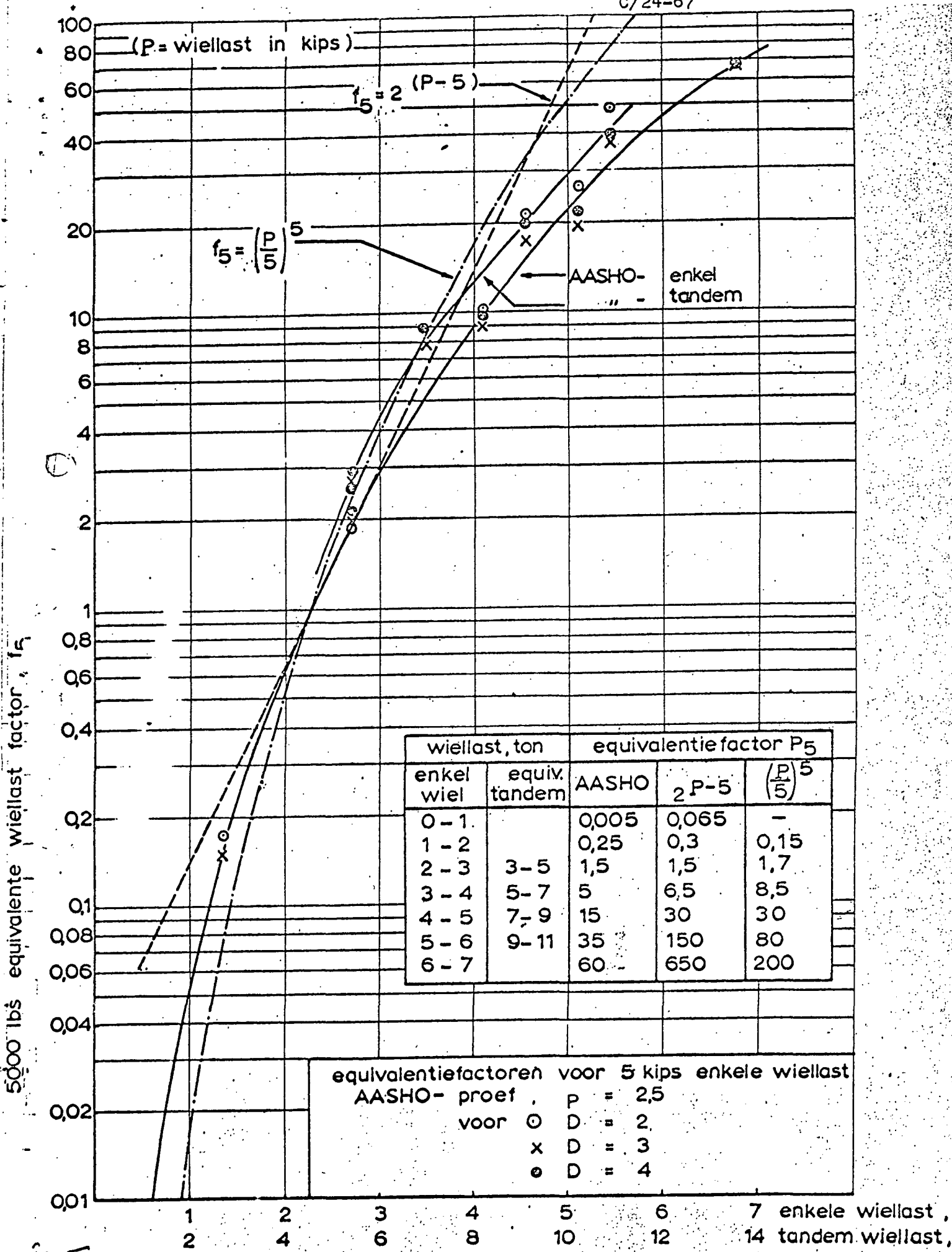


Relation between Number of Axle Load Applications and Permissible Tensile Strain in Asphalt



Relation between Number of Axle Load Applications and Maximum Vertical Compressive Strain in Subgrade



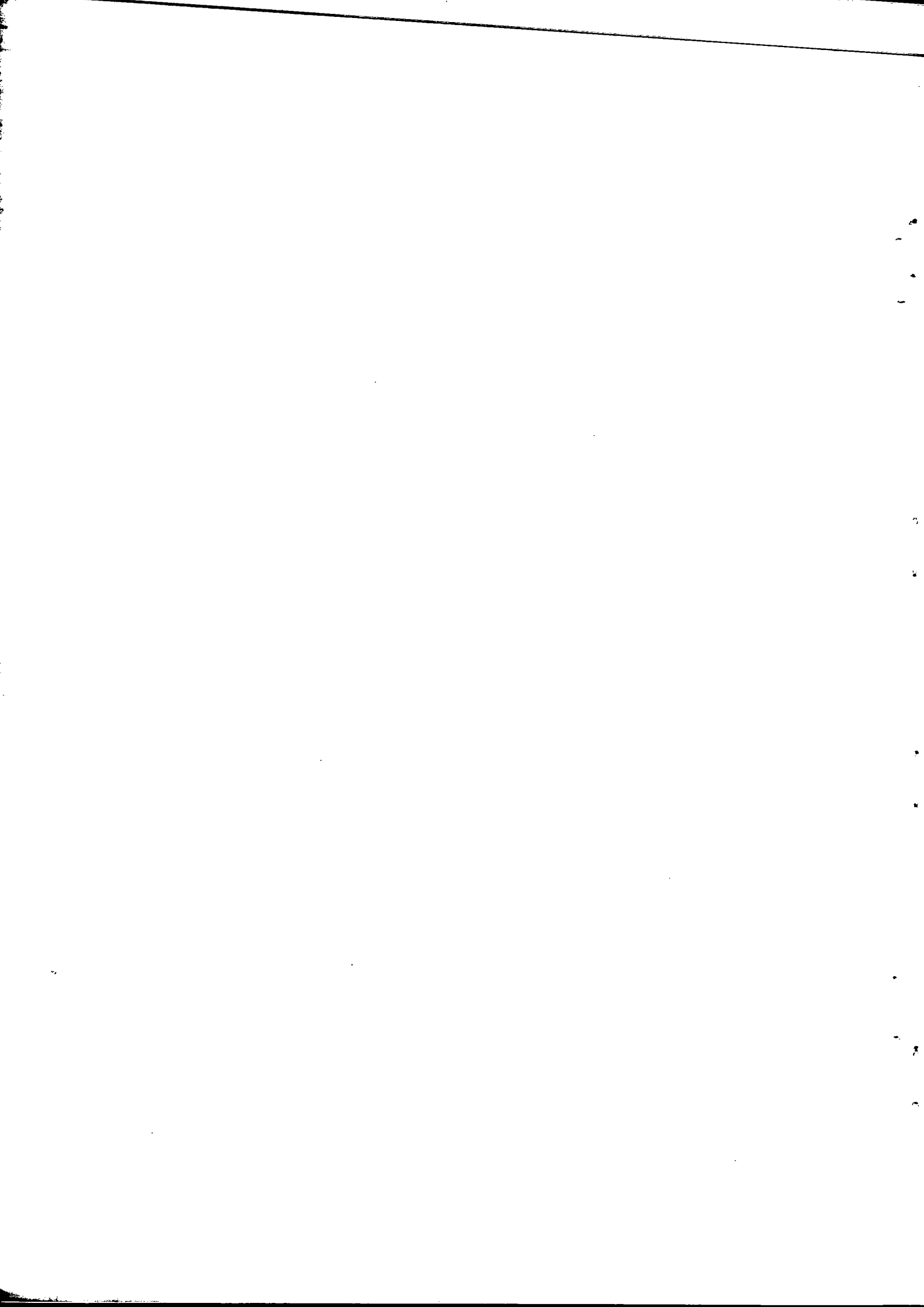


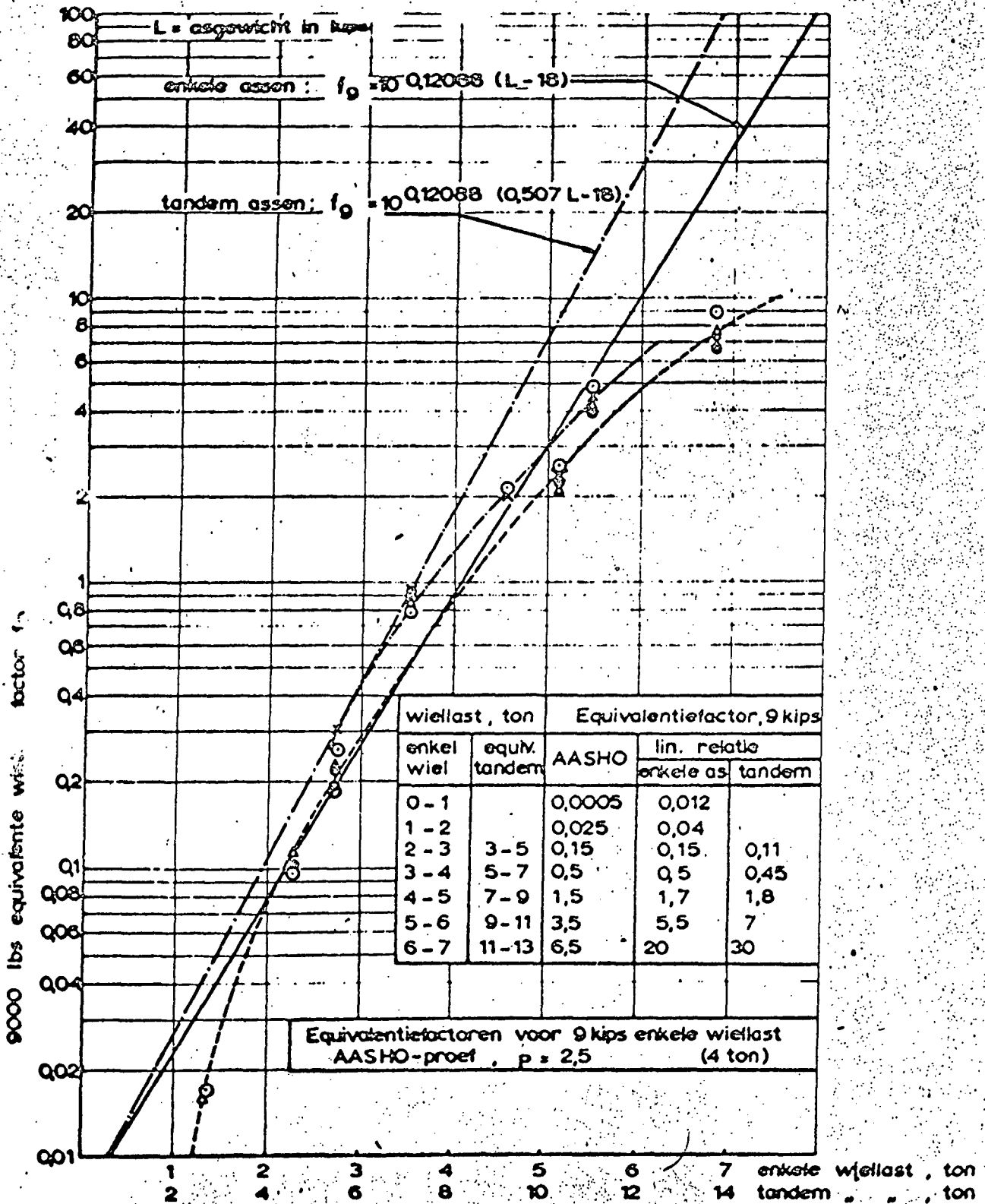
wiellast, ton		equivalentie factor P ₅		
enkel wiel	equiv. tandem	AASHO	2 P-5	$(\frac{P}{5})^5$
0-1		0,005	0,065	-
1-2		0,25	0,3	0,15
2-3	3-5	1,5	1,5	1,7
3-4	5-7	5	6,5	8,5
4-5	7-9	15	30	30
5-6	9-11	35	150	80
6-7		60	650	200

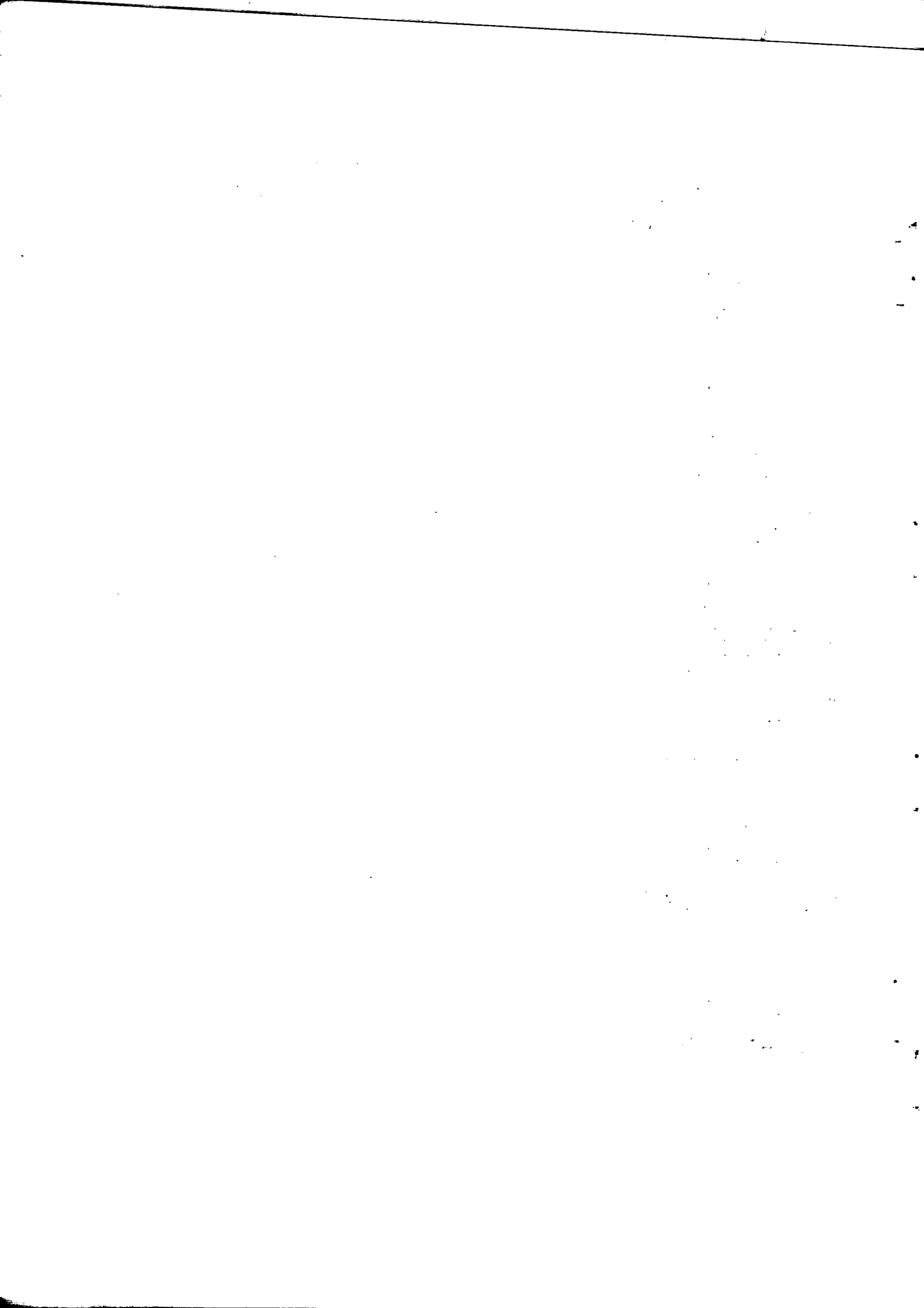
equivalentiefactoren voor 5 kips enkele wiellast
 AASHO- proef P = 2,5
 voor ○ D = 2
 x D = 3
 ⊙ D = 4

Verband tussen de equivalentiefactoren voor omrekening van een equivalente wiellast van 5 kips en de wiellast.

fig 5







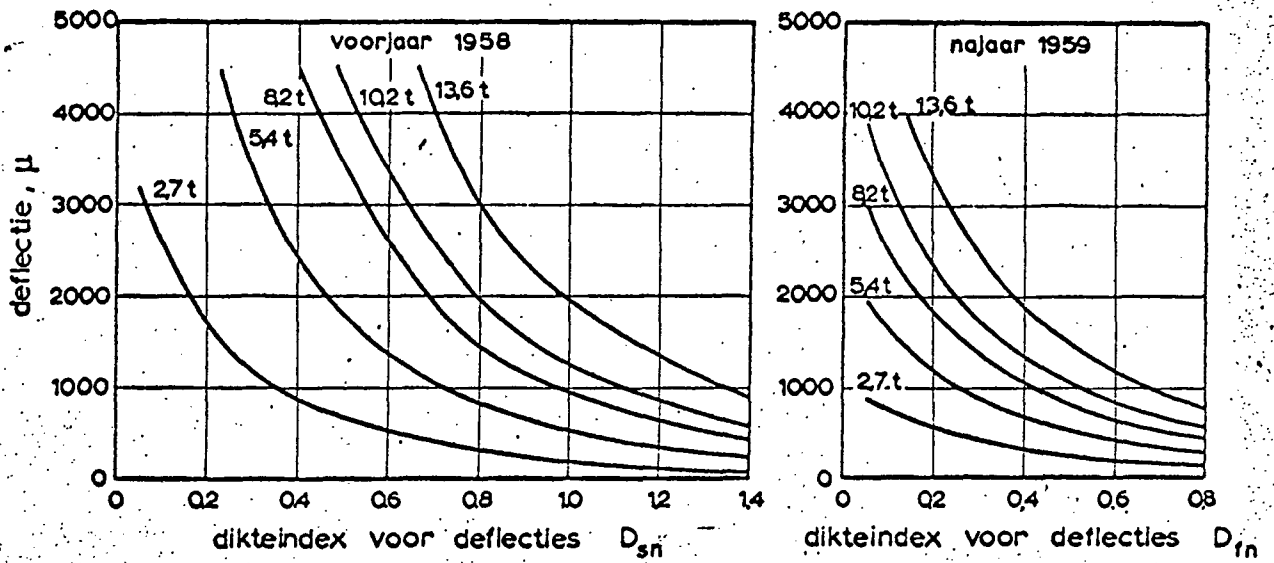
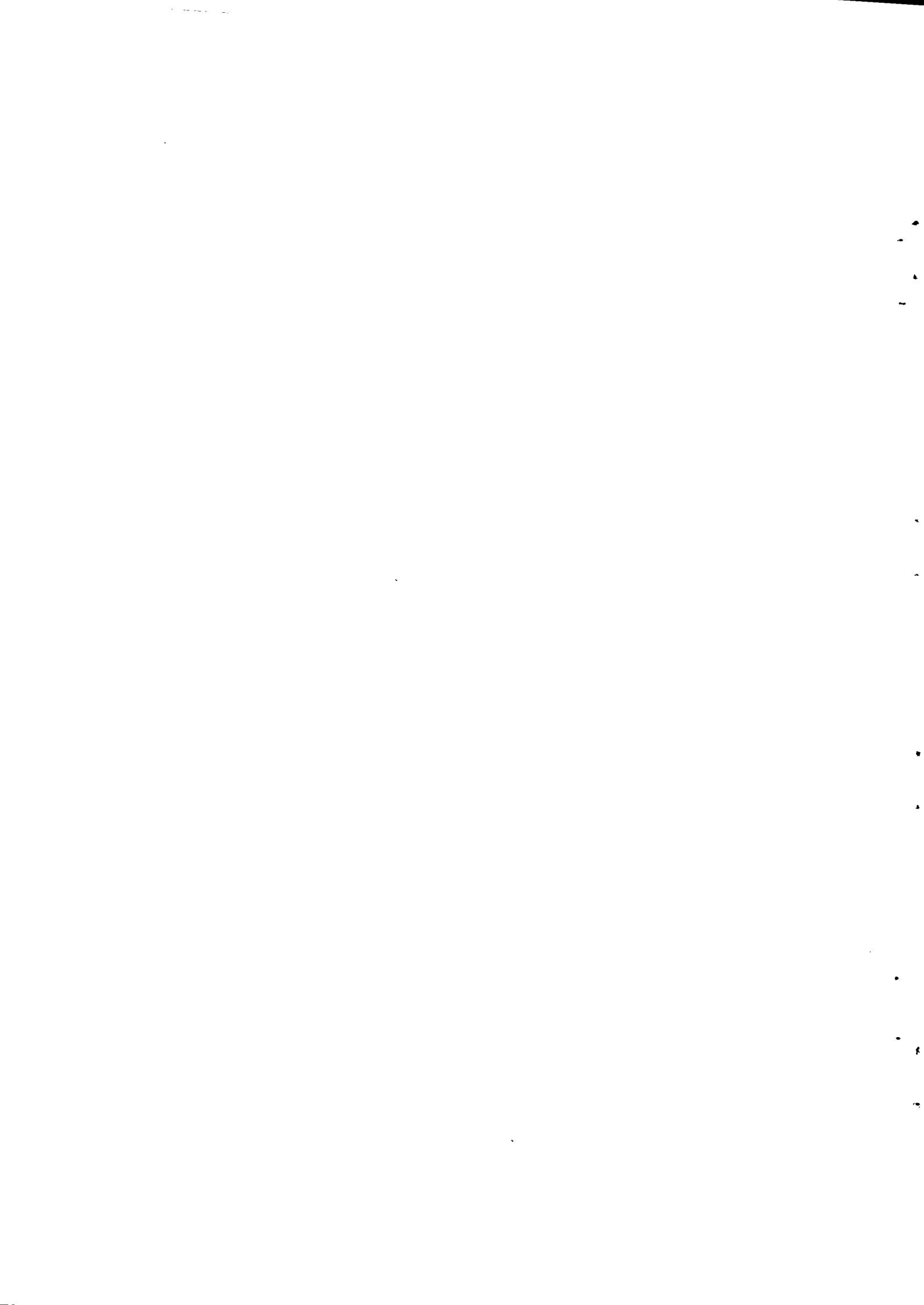


Fig. 7



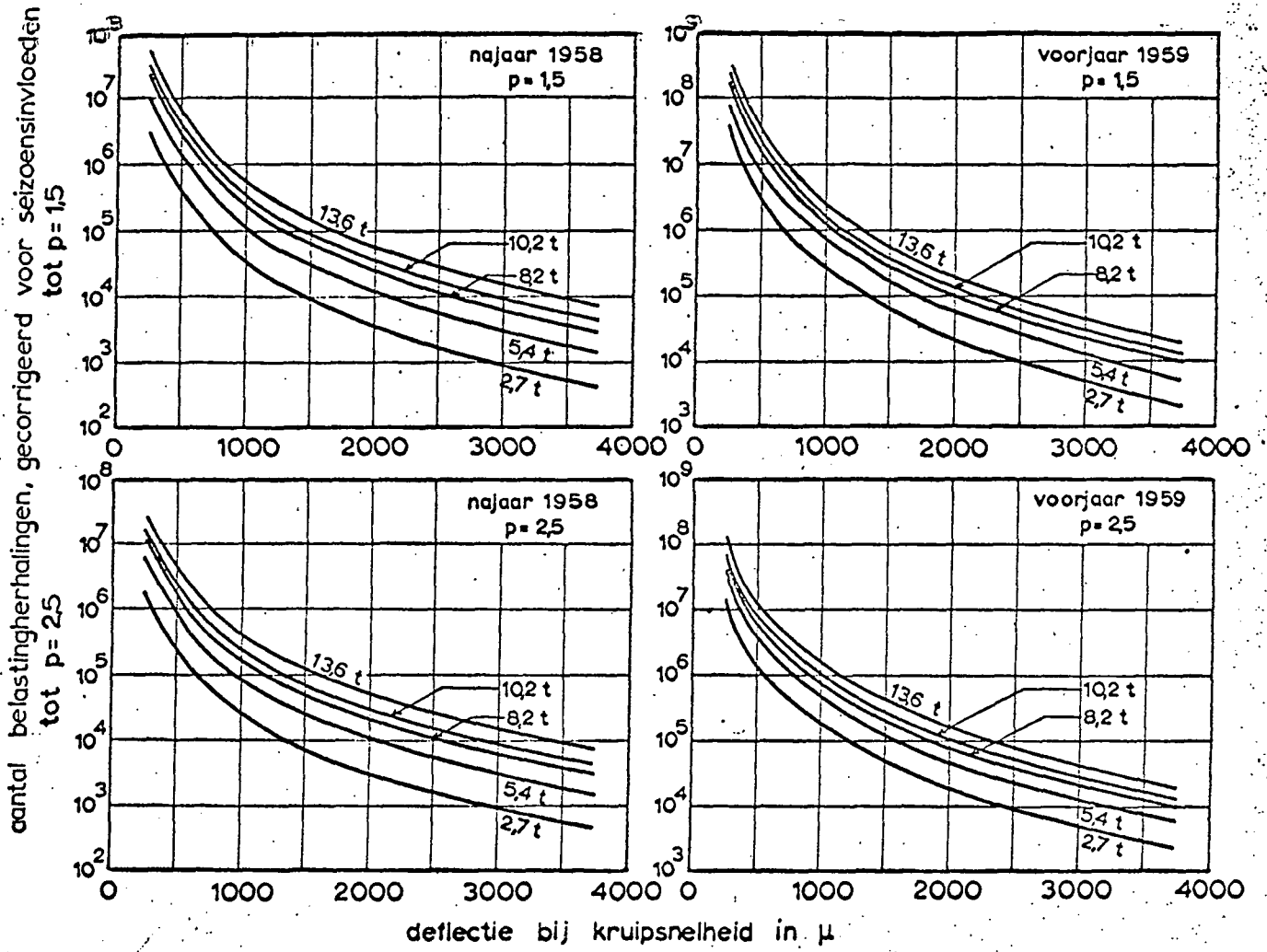
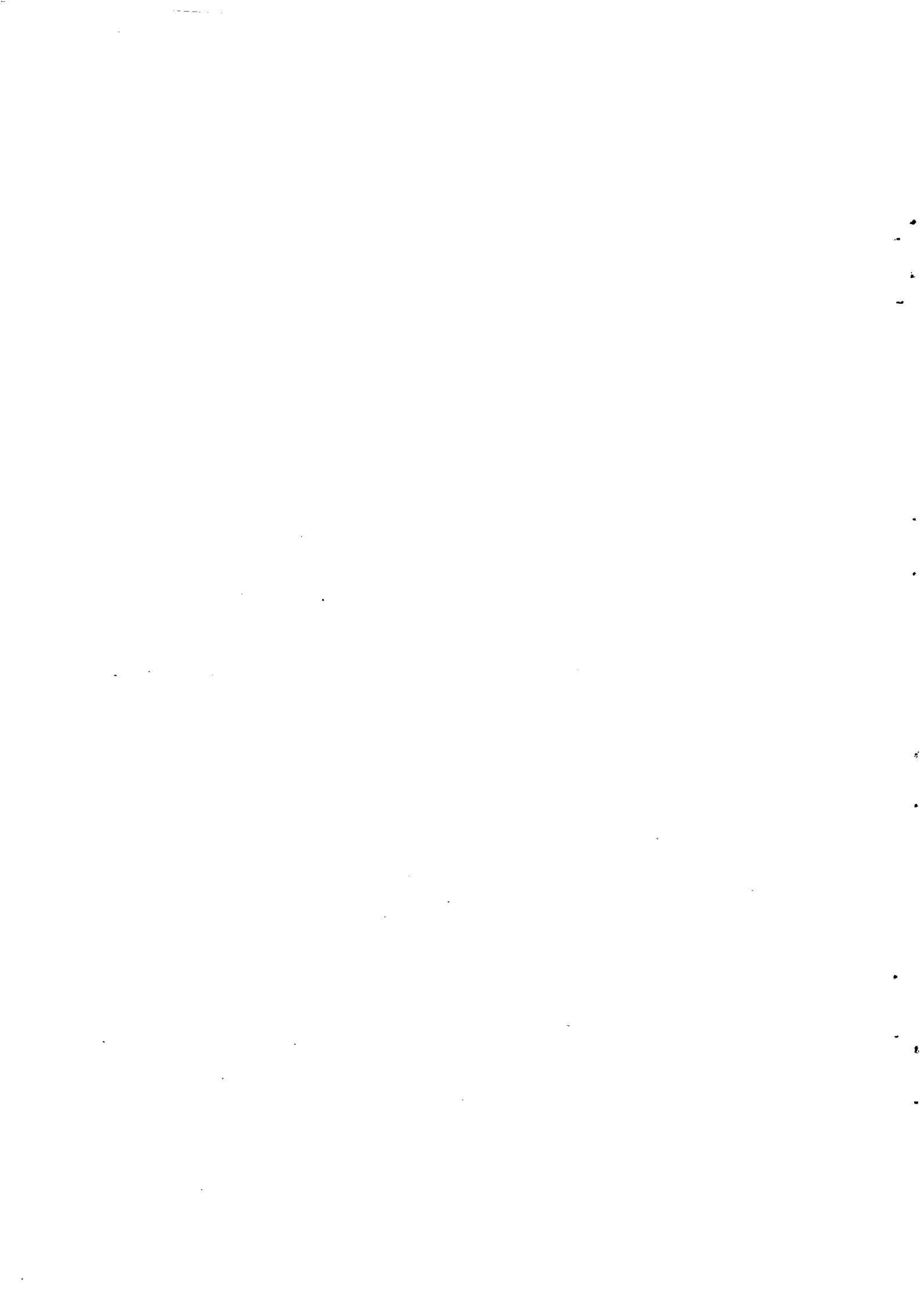


Fig. 8



N O T E
présentée par Dr. R. ADAMEK

I. Méthode de calcul

- 1) Parc automobile (sans les véhicules immobilisés, c.à.d. uniquement les véhicules en service) à la date du 1.7.1964.
- 2) Classification suivant la catégorie, dans la mesure où le recensement des kilométrages de 1959 donne des indications à ce sujet.
- 3) Calcul des valeurs de poids total par catégorie de véhicules de même taille :
 - pour les voitures de tourisme : poids à vide + 1,7 occupant à 75 kg (127,5 kg) + 0,6 de la charge maximale supplémentaire autorisée
 - pour les camions : poids à vide + moyenne de la charge utile du type de véhicule
 - pour les motocyclettes : 100 kg de poids à vide + 100 kg pour le conducteur + charge
 - pour les autobus : moyenne du poids minimum et du poids maximum + moyenne de la charge autorisée
 - etc. suivant estimation (sans inclure les tracteurs agricoles).
- 4) Multiplication du nombre de véhicules par le poids indiqué sous 3.
- 5) Calcul du kilométrage annuel en 1959 d'après les statistiques.
- 6) Multiplication de (4) et (5), résultat :
 - t/km/véhicules/année, suivant les catégories de véhicules (voir plus haut).
- 7) Division par deux des dépenses UI⁽¹⁾ au titre de 1964 (1,480 milliard de DM) afin de séparer les coûts qui dépendent du poids et du kilométrage du véhicule, des coûts à répartir uniformément, et détermination du facteur de ventilation : $\frac{UI}{2}$ par le résultat obtenu au point (6), en l'occurrence 0,003883 ou la moitié = 0,0019435.

(1) UI = dépenses d'entretien et de grosses réparations.

- 8) Répartition de $\frac{UI}{2}$ d'après ce rapport par catégorie de véhicules, c.à.d. multiplication des différentes valeurs sous (6) par la moitié du facteur obtenu au point (7).
- 9) Division de la moitié des dépenses UI à imputer par catégorie de véhicules et obtenue sous (8) par le nombre de véhicules de chaque catégorie. Résultat : charge par véhicule individuel pour chaque catégorie de véhicules.
- 10) Calcul du montant de la deuxième moitié des dépenses imputables à chaque véhicule en cas de répartition uniforme par la division
- $$\frac{UI}{2 \times \text{véhicules}} = 68,81 \text{ DM.}$$
- 11) Addition des valeurs sous (9) et (10) par catégorie de véhicules. On trouve ainsi le montant de la contribution annuelle, que, dans l'hypothèse de l'application de la méthode d'imputation en question, chaque véhicule suivant sa catégorie aurait à apporter aux dépenses d'entretien de 1964, et en même temps on a les coûts marginaux d'usage des routes dans la mesure où cet usage se reflète dans les dépenses d'entretien.

II. Remarques complémentaires et conclusions

Dans la mesure où il a fallu se baser sur des hypothèses, celles-ci demeurent naturellement discutables. Il s'agit d'un calcul à titre d'exemple, qui vise à montrer et à illustrer la méthode mais qui ne prétend pas arriver à un résultat final officiel. Si l'on variait quelque peu ces hypothèses on risquerait d'aboutir encore à certaines modifications. Si par exemple, pour ne citer qu'un problème, on ne ventilait pas la moitié des dépenses UI selon deux méthodes différentes, toutes les dépenses UI étant réparties soit selon la catégorie de véhicules, le poids et le kilométrage, soit simplement de manière uniforme, on obtiendrait comme extrêmes, dans le premier cas, le doublement des résultats divergents figurant à la colonne 9, ou, dans le deuxième cas, pour chaque ligne la valeur moyenne uniforme double ($2 \times 68,81 \text{ DM}$) à la place de la colonne 10. Si, en cherchant des données exactes de manière

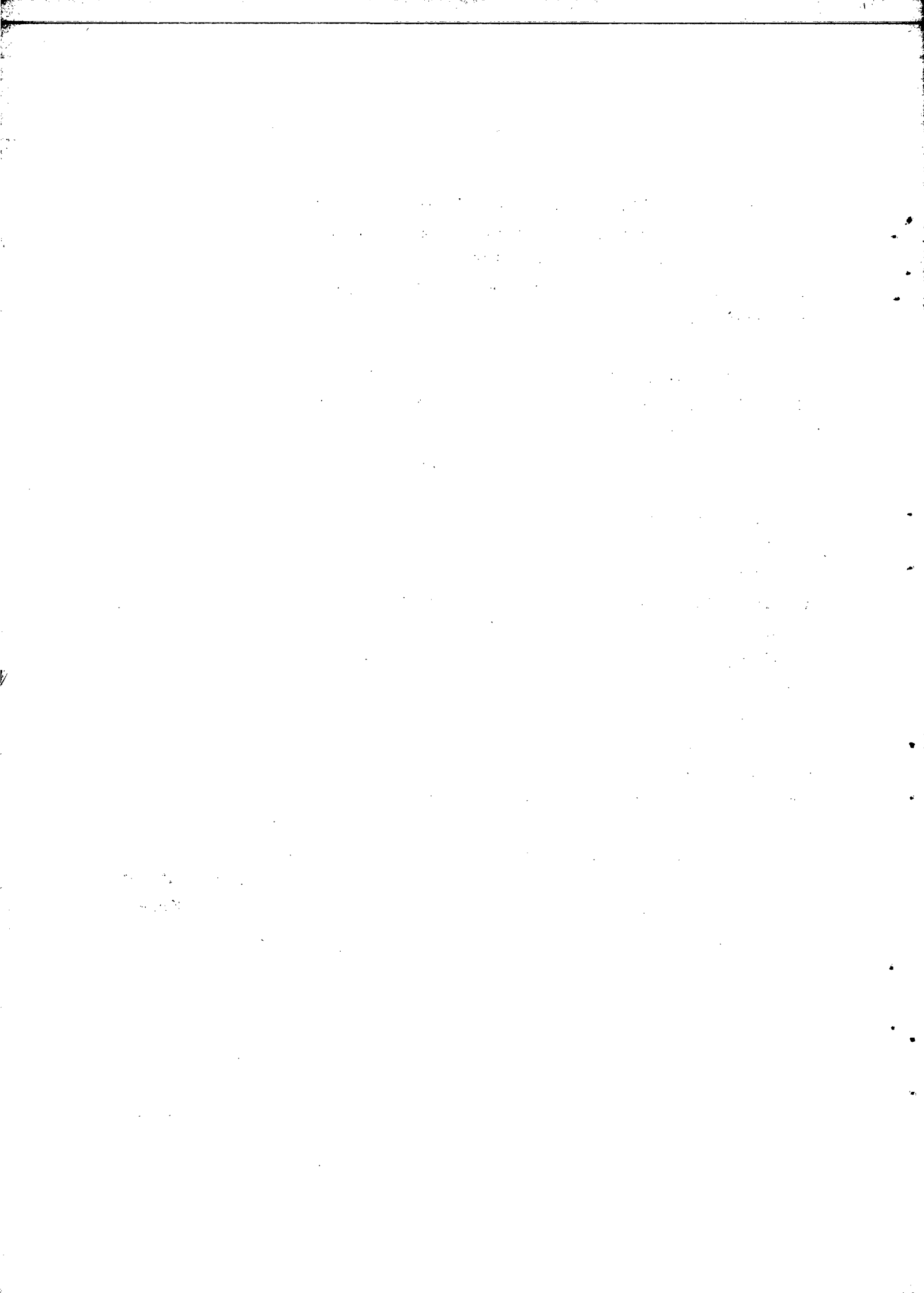
.../...

à ce qu'elles reflètent la réalité, c'est-à-dire sans qu'il soit nécessaire de procéder par hypothèses et estimations, on arrive à une décomposition des dépenses UI un peu différente de la division en deux moitiés, les valeurs se situent entre le résultat fourni par l'exemple et les deux extrêmes.

Le calcul, qui pour le moment ne porte que sur les dépenses UI et qui ne tient pas compte de toutes les autres dépenses ou coûts, montre la nette différenciation de la répartition des charges selon les catégories de véhicules ainsi que selon les poids et les kilométrages moyens.

Les tableaux sur la répartition des dépenses UI 1950 - 1964 en fonction du parc respectif de véhicules, ainsi que les deux graphiques qui s'y rapportent, montrent à quel point la marge de variation des véritables coûts marginaux est faible pour ce poste de dépenses (coûts). Le montant des coûts moyens par véhicule varie si peu à partir de 1954, que l'on peut poser indifféremment coûts unitaires = coûts marginaux ou coûts marginaux = coûts unitaires. Le calcul à titre d'exemple montre à nouveau que, en cas de distinction par catégorie de véhicules, poids et kilométrage, les coûts unitaires et par suite les coûts marginaux varient parfois très sensiblement : entre la voiture légère la plus petite et le camion (sans remorque) le plus lourd, le rapport est de 150 et avec remorque il approche 175. Il ne peut donc y avoir une valeur unique pour les coûts marginaux. La formation de moyennes est évidemment intéressante, probante, démonstrative, mais elle ne présente un intérêt que sur le plan de la connaissance générale et est sans valeur opérationnelle du point de vue de la ventilation des dépenses.

.../...



Calcul des coûts marginaux d'entretien en fonction des catégories de véhicules, du poids et du kilométrage

Dépenses d'entretien en 1964 : 1 480 millions de DM

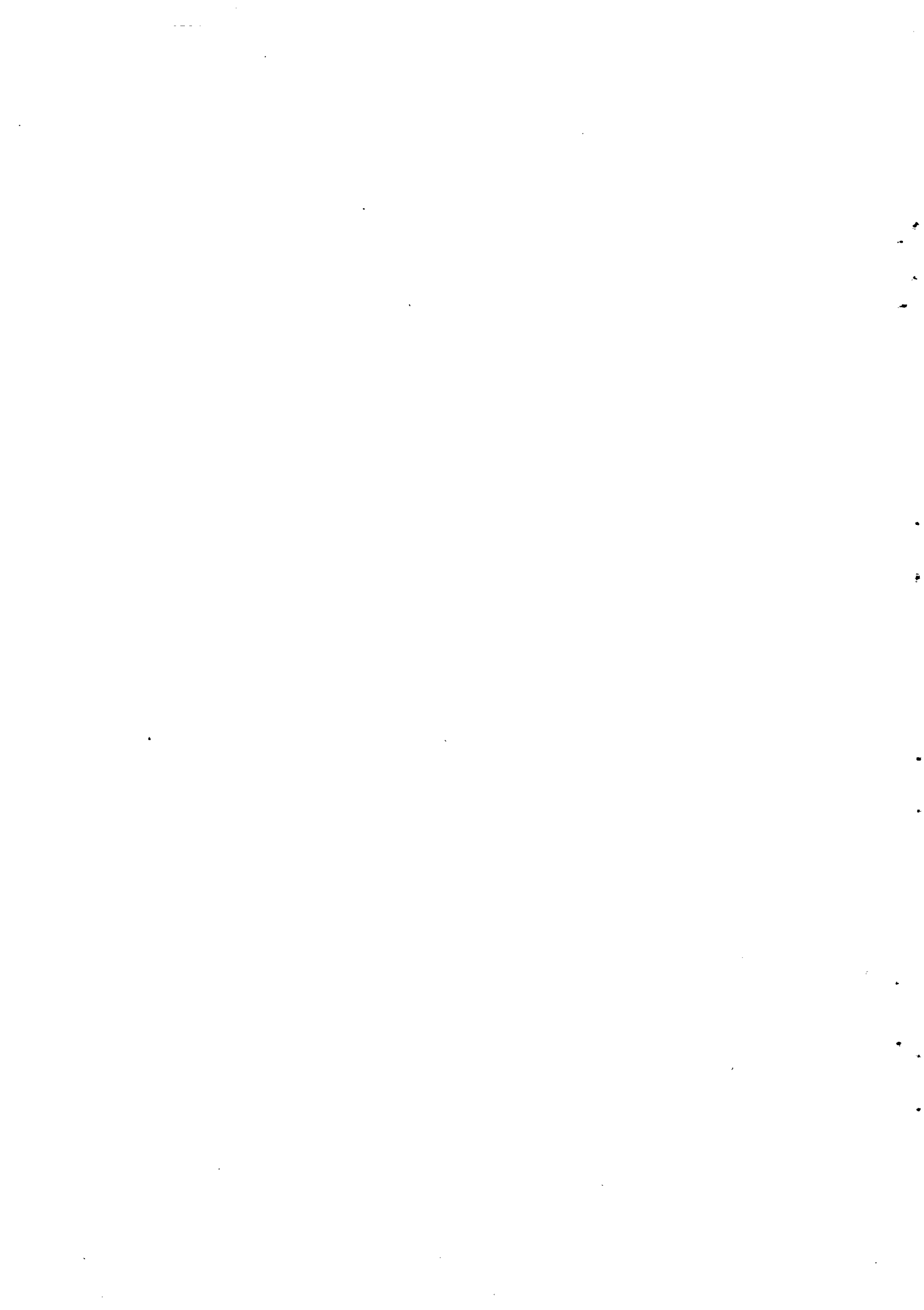
N°	Catégorie de véhicules	Nombre de véhicules au 1.7.1964			∅ Kilométrage annuel d'après le recensement de 1959	∅ Poids total x nombre de véhicules	UI ² par catégorie de véhicules suivant poids et kilométrage (2)	Répartition par véhicule col. 8	En ajoutant 68,81 DM col. 3
		Poids total par unité (1)	Nombre	∑ des poids totaux des véhicules					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		kg	unités	t	km/an	en milliers de t/km/an/unités	DM	DM	
1	Motocyclettes	646 600	200	129 320	8 200	1 060 424	2 058 813,20	3,18	71,99
2(3)	Voitures légères	a) 440 225	555	244 325	12 400	3 029 630	5 882 026,65	13,36	82,17
3(3)		b) 1 442 295	890	1 283 645	16 500	21 180 143	41 121 247,63	28,51	97,32
4(3)		c) 4 187 464	1 085	4 543 400	19 400	88 141 960	174 991 742,60	41,79	110,60
5(3)		d) 1 165 516	1 525	1 777 410	27 400	15 152 834	29 419 227,21	25,24	94,05
		<u>7 235 500</u>		<u>7 848 780</u>		<u>127 504 567</u>	<u>251 414 244,09</u>	<u>34,75</u>	
6	Fourgonnettes	512 600	1 470	753 600	22 500	16 954 245	32 916 666,67	64,22	133,03
7	Autobus	36 000	11 300	406 800	40 000	16 272 000	31 592 088,00	877,56	946,37
8(4)	Camion	a) 450 100	2 000	900 200	21 200	19 084 240	37 052 051,96	82,32	151,13
9(4)		b) 151 800	5 185	787 083	30 000	23 612 490	45 843 649,34	302,00	370,81
10(4)		c) 72 700	8 635	627 765	46 200	29 002 713	56 308 767,29	774,54	703,35
11(4)		d) 66 400	14 325	951 180	71 500	68 009 370	132 040 191,86	1988,56	2 057,37
		<u>741 000</u>		<u>3 266 228</u>		<u>139 708 813</u>	<u>271 244 660,44</u>	<u>366,05</u>	

(1) Pour les voitures légères : poids à vide + 1,7 occupant à 75 kg + 0,6 de la charge maximale supplémentaire autorisée; pour les camions : poids à vide + moyenne de la catégorie de charge utile.

$$(2) E_U = \frac{\sum \text{dépenses / entretien / an}}{\sum \text{véhicules}_1 \cdot \text{km/an} + \sum \text{véhicules}_2 \cdot \text{km/an} + \sum \text{véhicules}_3 \cdot \text{km/an} \dots + \sum \text{véhicules}_u \cdot \text{km/an}}$$

(3) Voitures légères : a) - 499 cm³, b) 500 - 999 cm³, c) 1 000 - 1 499 cm³, d) 1 500 cm³ et plus.

(4) Camions : a) - 1 499 kg de charge utile, b) 2 000 à 4 999 kg C.U., c) 5 000 - 6 499 kg C.U., d) 6 500 kg C.U. et plus.

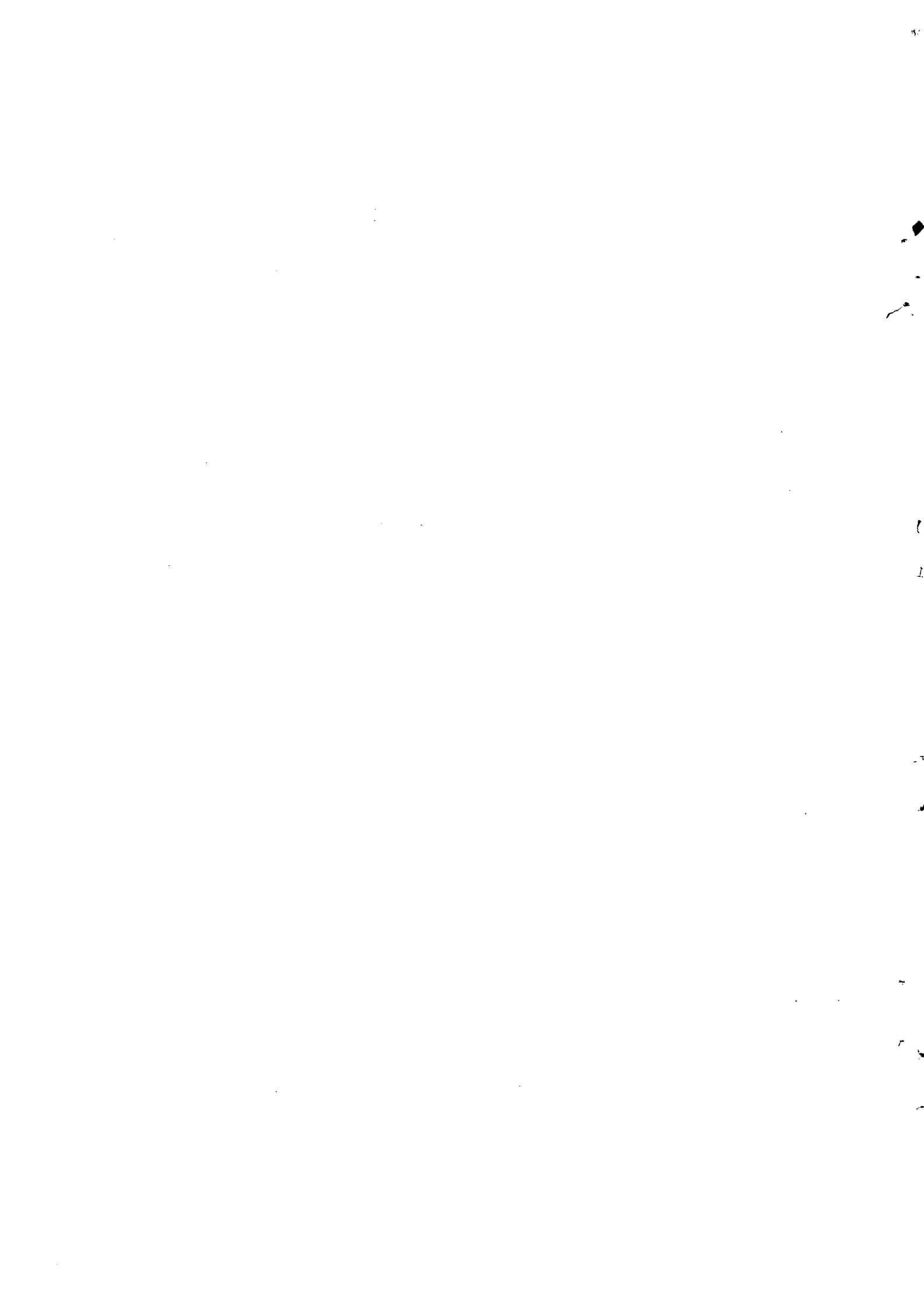


1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		kg	unités	t	km/an	en milliers de : t/km/an/unité:		DM	DM
12	Tracteurs en général	70 000	2 000	140 000	17 500	2 450 000	4 756 675,00	67,95	136,76
13	Semi-remorque	20 800	5 500	114 400	40 000 ^(?)	4 576 000	8 884 304,00	427,13	495,94
14	Tracteurs agricoles	1 022 900	exempts de charges d'infrastructure (de taxe sur les huiles minérales)					-	68,81
		1 113 700							
15	Ambulances	5 500	1 500	8 250	25 000	231 000	448 486,50	81,54	150,35
16	Véhicules spéciaux	67 900	4 000	271 600	13 400	3 639 440	7 065 972,76	104,06	172,87
	Σ Véhicules à moteur	10 358 800			17 200	314 398 489	606 577 783,40	58,56	127,37
	Remorques	395 600	8 000	3 164 800	21 100	66 777 280	129 648 089,14	327,73	396,54
		10 754 400				381 175 769	740 000 000,00	68,81	137,62

Facteur : 0,0019415

Ecart : 0,06 %

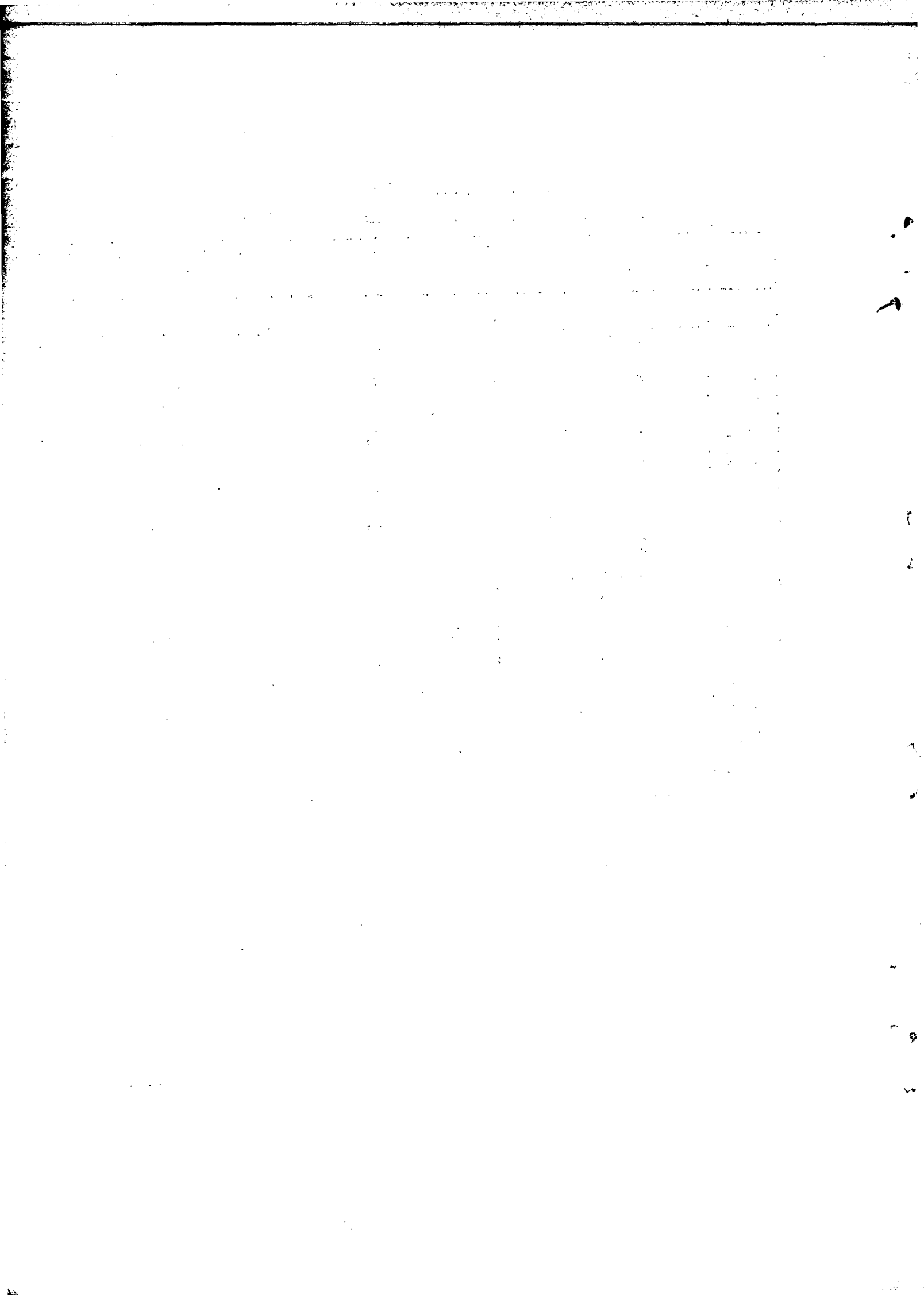
.../...



Répartition des dépenses d'entretien
de 1950 - 1964 en fonction du nombre de véhicules

: Année :	: Nombre de véhicules : total :	: Dépenses d'entretien : en millions de DM :	: Dépenses par unité/DM : (colonne 4 par rapport : à colonne 2) :
: 1 :	: 2 :	: 3 :	: 4 :
: 1950 :	: 2 020 935 :	: 269,4 :	: 133,30 :
: 1951 :	: 2 583 781 :	: 472,0 :	: 182,68 :
: 1952 :	: 2 929 600 :	: 531,0 :	: 181,25 :
: 1953 :	: 3 417 000 :	: 602,0 :	: 176,18 :
: 1954 :	: 4 103 400 :	: 604,4 :	: 147,29 :
: 1955 :	: 4 557 200 :	: 671,2 :	: 147,28 :
: 1956 :	: 5 052 800 :	: 741,8 :	: 146,81 :
: 1957 :	: 5 666 300 :	: 762,9 :	: 134,53 :
: 1958 :	: 6 224 500 :	: 843,5 :	: 135,51 :
: 1959 :	: 6 602 000 :	: 885,2 :	: 134,08 :
: 1960 :	: 7 295 200 :	: (3/4) 747,8 :	: 102,51 :
: 1961 :	: 7 993 200 :	: 1 015,6 :	: 127,06 :
: 1962 :	: 8 777 600 :	: 1 121,4 :	: 127,76 :
: 1963 :	: 9 512 900 :	: 1 323,2 :	: 139,10 :
: 1964 :	: 10 358 800 :	: 1 480,2 :	: 142,89 :
: :	: :	: :	: :
: :	: :	: :	: :

.../...

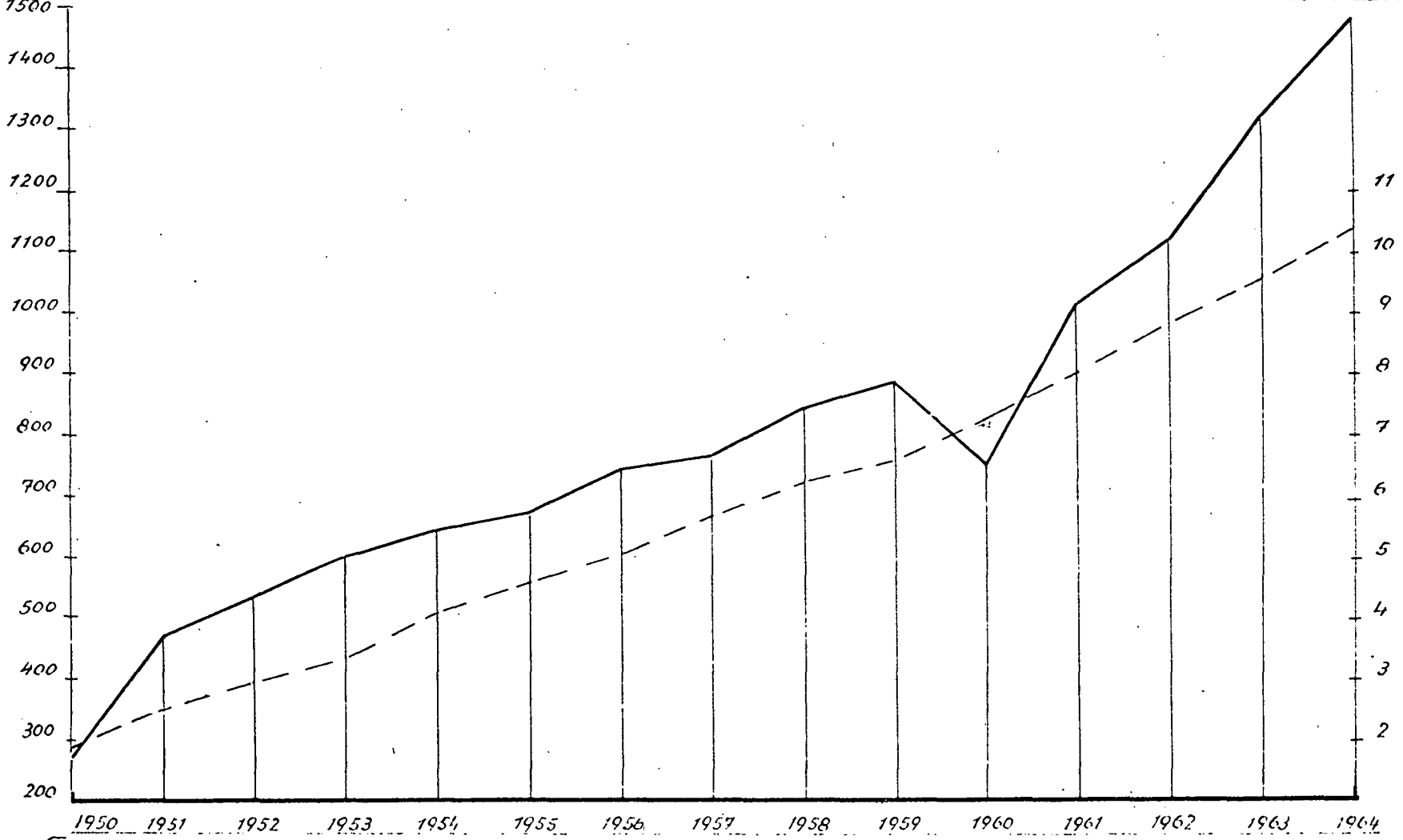


Evolution des coûts de construction et d'entretien
Entwicklung der Straßen-u. Unterhaltungsausgaben
in der BRD 1950-1964

en R.F.A. 1950 - 1964

Mill. DM
UJ - Ausgaben
Dépenses UI
7500

Mill. Kfz.
Mio Véhicules



Véhicules =

2020935	2583781	2929600	3417000	4103400	4557200	5052800	5666300	6224500	6602000	7245200	7993200	8774600	9512900	10358600
---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	----------



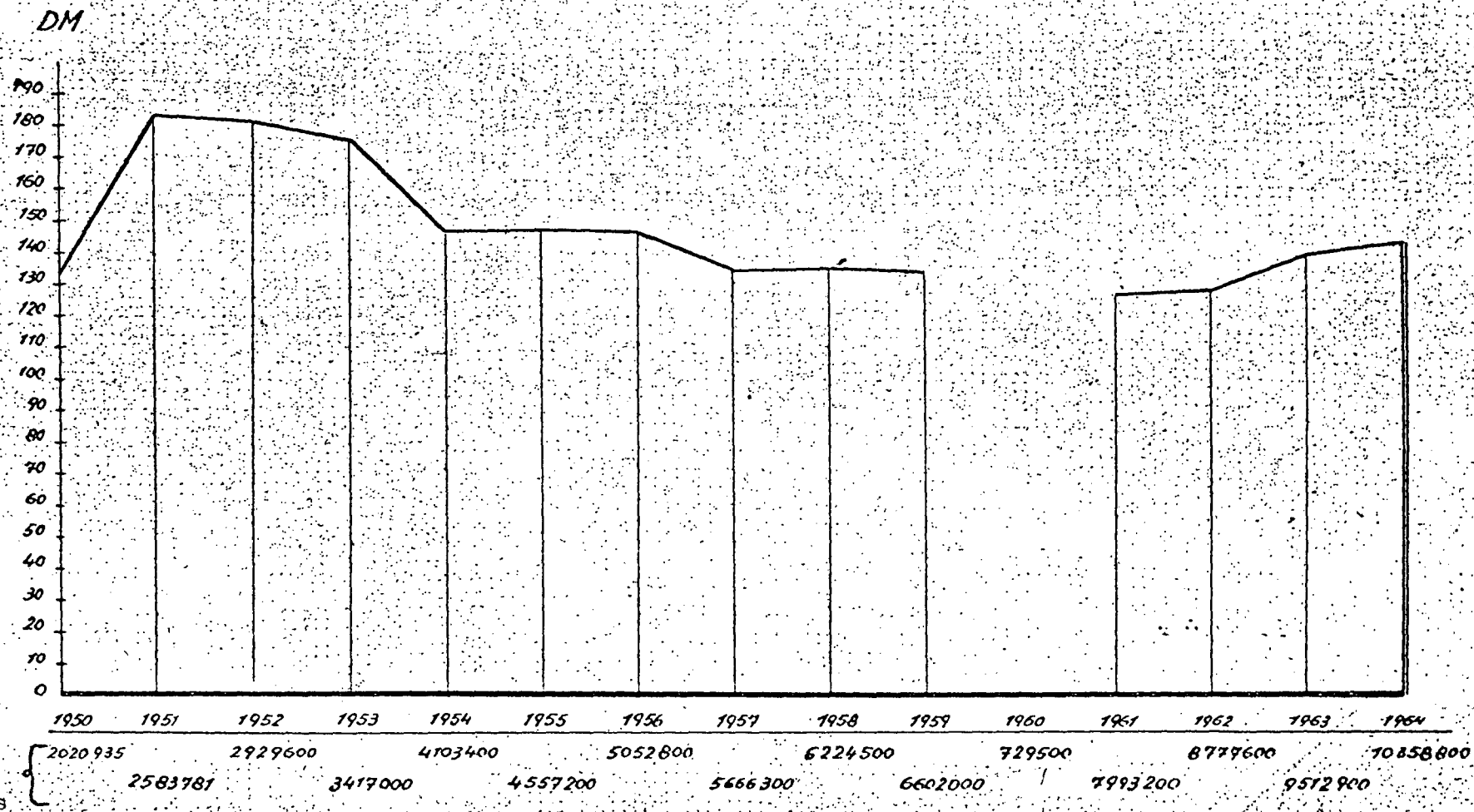
Evolution des coûts unitaires/marginaux sur la base des dépenses UI

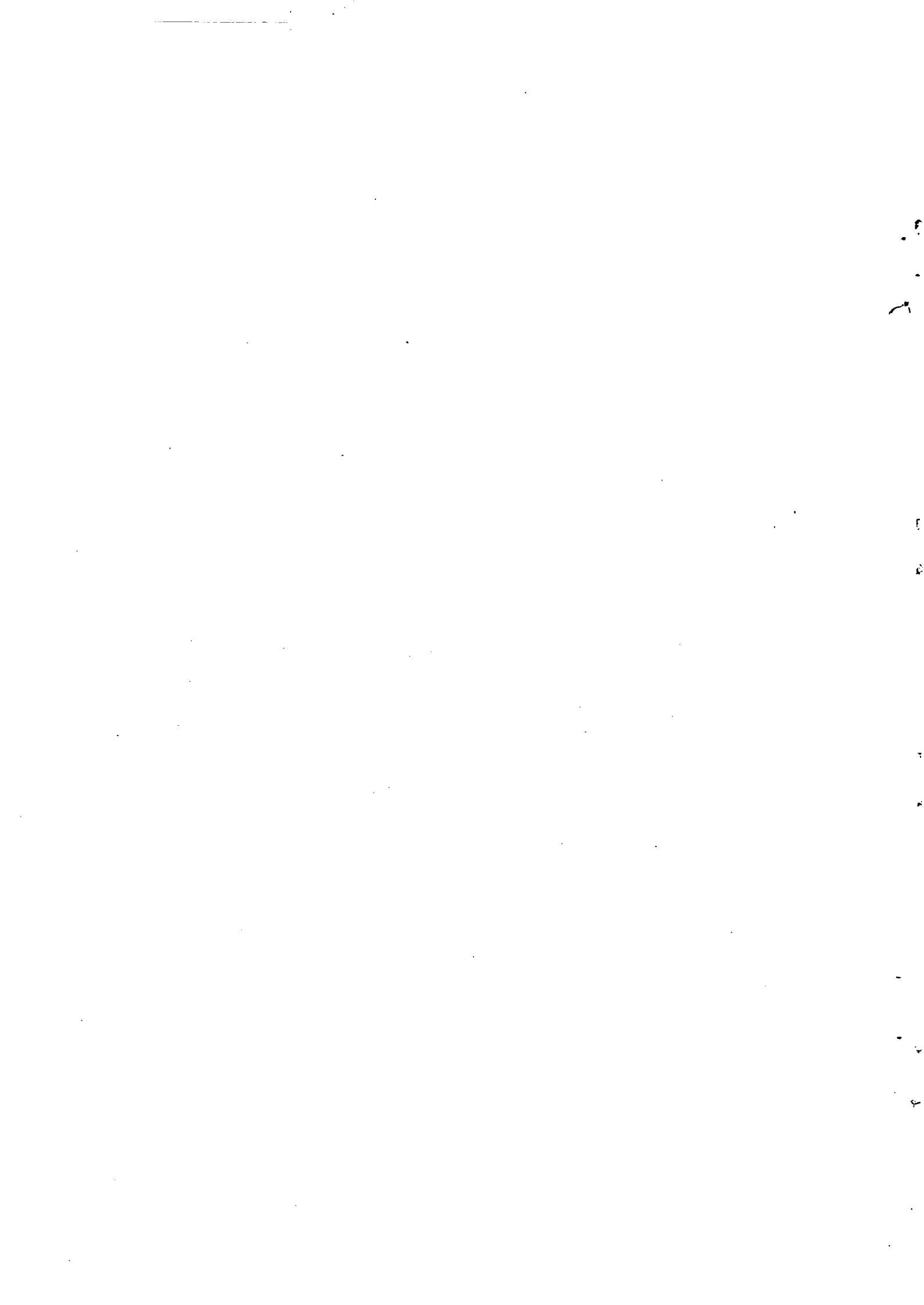
Stück = Grenzkostenentwicklung auf Grund der UJ-Ausgaben

in der BRD 1950 - 1964

en R.F.A. 1950 - 1964

$$\frac{\sum UJ}{\sum Kfz.} = \frac{\sum UI}{\sum \text{véhic.}}$$





Note présentée par le Prof. Corrado GUZZANTI

Introduction

L'objet de la présente note est de démontrer que les coûts marginaux d'usage d'une infrastructure routière (et généralement d'une infrastructure de transport) ne dépendent directement de l'état physique dans lequel cette infrastructure se trouve que si nous nous limitons à considérer la situation de fait existant à un moment donné, c'est-à-dire uniquement si nous considérons sa valeur prise au moment où elle est estimée, laquelle n'est qu'une valeur particulière du coût d'usage historique.

Toutefois, on peut se demander si c'est bien la valeur historique actuelle du coût marginal d'usage qui doit être considérée dans le cadre général d'une politique économique des transports (en particulier en se référant aux conclusions de l'étude n° 1 de la Série transports de la C.E.E., Bruxelles 1965). En effet, ce faisant, on tiendrait compte de la situation particulière dans laquelle chaque infrastructure se trouve (par exemple : utilisation - par un trafic intense - d'installations qui n'ont pas été conçues et adaptées à ce trafic) et l'on ne tiendrait plus aucun compte de la possibilité d'optimiser le coût d'usage sur la base du trafic actuel et des prévisions du trafic futur.

Ce problème doit être séparé de celui de la politique des investissements des infrastructures (ou de celui de l'extension et de l'amélioration des infrastructures existantes) qui vise, dans le cadre d'une politique d'aménagement des territoires, à créer des moyens de transport conçus en vue d'optimiser les rendements économiques internes et externes sur la base des prévisions à moyen ou à long terme, pour une allocation optimum des activités et des installations humaines. Ce dernier problème est un problème beaucoup plus vaste dont la solution est

.../...

déterminée également, par exemple, par des considérations concernant les tracés, la topologie du "profil" des infrastructures possibles ainsi que le choix entre les différents moyens de transport.

Il demeure toutefois nécessaire d'utiliser rationnellement les installations existantes et de les adapter aux besoins actuels et à ceux d'un avenir proche. Dans le secteur routier, cette adaptation intéresse surtout l'optimisation de la vie technique du revêtement des surfaces de roulement.

On ne peut donc pas limiter les recherches à la seule détermination de la valeur historique actuelle du coût d'usage, d'autant plus que les résultats des essais AASHO, quoique partiellement contestés, peuvent être considérés comme valables quand on constate que le coût d'entretien diminue sensiblement lorsque la structure de la surface de roulement est réalisée selon des techniques et avec des dimensions adaptées aux charges : c'est-à-dire quand elle est loin d'être "saturée" (également) quant à son aptitude à résister au passage des charges.

Cette constatation conduit à la nécessité d'analyser les rapports existant entre les charges d'entretien et les charges de renouvellement, ces deux catégories de charges contribuant en effet à déterminer les coûts d'usage et les coûts marginaux d'usage de l'infrastructure. Toutefois, ce sont les seules charges de renouvellement qui reflètent le dimensionnement de la surface de roulement.

Il est donc nécessaire d'examiner le fait qu'une valeur historique actuelle élevée du coût marginal d'usage soit la conséquence de l'utilisation d'une technique inadaptée qui rend l'usage de l'infrastructure plus coûteux.

1 - Les considérations qui suivent s'appliquent à une infrastructure quelconque de transport dans l'hypothèse selon laquelle :

- 1°) Une partie A de l'infrastructure est telle que l'entretien (de coût a par unité de temps) lui assure une vie infinie : c'est-à-dire que la partie A n'est pas sujette à renouvellement ;
- 2°) Une partie M est telle que l'entretien (de coût m par unité de temps) en assure la viabilité, dans des conditions d'exploitation satisfaisantes, pendant une période de temps t ; après cette période, il sera nécessaire de procéder au renouvellement de M, ce qui entraînera une charge R ; aussi bien l'entretien que le renouvellement n'altèrent pas l'aptitude de l'infrastructure à résister au passage de la circulation ;
- 3°) La régulation de la circulation implique un coût γ par unité de temps.

Donc, à la fin d'une période quelconque t (°), le coût d'usage de l'infrastructure sera (en laissant de côté les charges d'intérêt) :

$$C = (a + m + \gamma) t + R \quad (1)$$

(°) En principe, pour la partie M, à la fin d'une période de temps généralement quelconque t , il existe nécessairement des charges de renouvellement R .

Pourtant, en pratique, à des valeurs faibles de t , correspondent en général de faibles valeurs de R ; de sorte que, en général, on se réfère à des valeurs de t suffisamment grandes auxquelles correspondent des valeurs raisonnables de R .

.../...

On peut supposer - en principe - qu'aussi bien a que γ_c sont partiellement indépendants de la circulation ; qu'ils dépendent partiellement du nombre de véhicules circulant pendant la période t et partiellement du poids des véhicules (nombre de tonnes circulant pendant la période t).

C'est-à-dire que l'on pourra écrire :

$$a = a_o + a_n (N) + a_p (P) \quad (2)$$
$$\gamma_c = \gamma_{c_o} + \gamma_{c_n} (N) + \gamma_{c_p} (P)$$

où N et P représentent les deux grandeurs citées qui correspondent à l'importance de la circulation respectivement en termes de nombres de véhicules et de poids.

m - à égalité de condition - varie avec R ; m , en général, diminue quand les charges de renouvellement croissent (par suite du choix de techniques de construction qui, de plus en plus, dimensionnent la structure par rapport aux charges - supposées constantes - qui utilisent l'infrastructure). De sorte qu'à (2) on peut ajouter :

$$m = m (R) = m_o (R) + m_n (N,R) + m_p (P,R) .$$

° °

2 - Il convient d'introduire des hypothèses simplificatrices : nous supposons que la fonction a peut être considérée comme intégrée dans le coût m ; que :

$$\gamma_c = 0$$

.../...

c'est-à-dire que l'infrastructure n'a pas besoin de régulation. On supposera, en outre, que la circulation est homogène (c'est-à-dire composée de véhicules identiques) et que, par conséquent, son volume peut être exprimé par la variable indépendante H qui représente, à deux niveaux différents, aussi bien le nombre de véhicules que le poids total correspondant.

De sorte que l'on écrira :

$$C = mt + R \quad (1 \text{ bis})$$

$$m = m(R) = m_0(R) + m_h(H, R) \quad (2 \text{ bis}) .$$

On indique par h le volume de la circulation par unité de temps :

$$h = h(T) \quad (3)$$

qu'on suppose être (fig. 1) une fonction - évidemment positive - croissante

$$\left(\frac{dh}{dt} > 0\right) \text{ de } t.$$

Le volume H à la fin de la période t sera :

$$H = \int_0^t h(t)dt = H(t) \quad (4)$$

pour laquelle on a $\frac{dH}{dt} > 0$ et d'où l'on tire la fonction réciproque :

$$t = t(H)$$

elle aussi telle que $\frac{dt}{dH} > 0$.

La fonction (2 bis) dans l'espace (m, R, H) représente une surface $S(m, R, H)$ à partir de laquelle on peut obtenir différents ensembles de courbes en sectionnant le solide qu'elle délimite par des plans parallèles $H = \text{coût}$ (fig. 2) ; ou $m = \text{coût}$ (fig. 3) ; ou $R = \text{coût}$ (fig. 4). Ces courbes ont été représentées graphiquement sur la

.../...

base des considérations suivantes :

a) Pour H constant, les nécessités d'entretien sont d'autant plus faibles que les dimensions de l'infrastructure dépendent plus largement de H ; on écrira :

$$\left. \begin{aligned} H &= \text{coût} \\ m &= m_0(R) + m(R) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

dans laquelle $m > 0$; $\frac{dm}{dR} > 0$ (fig. 2)

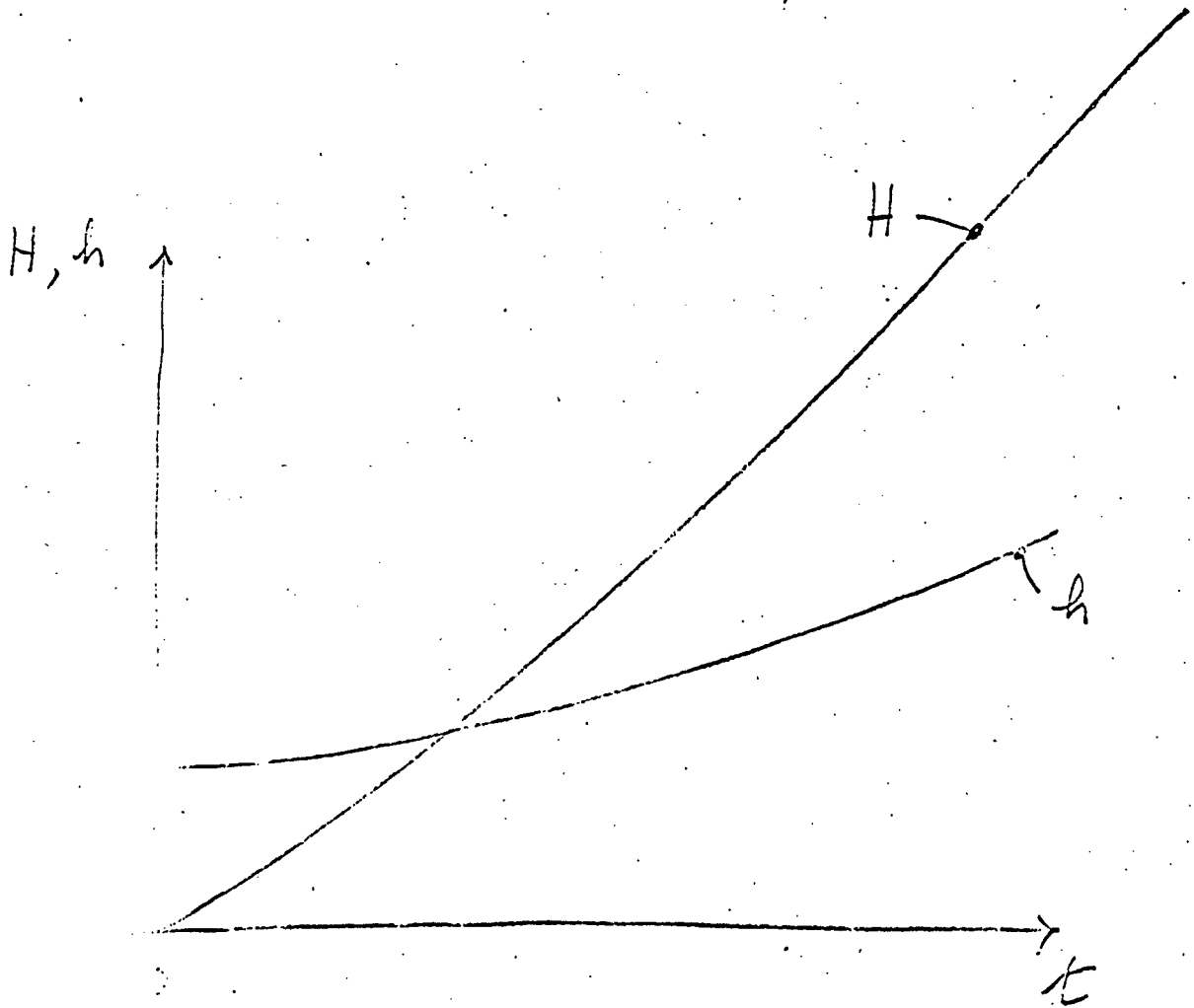
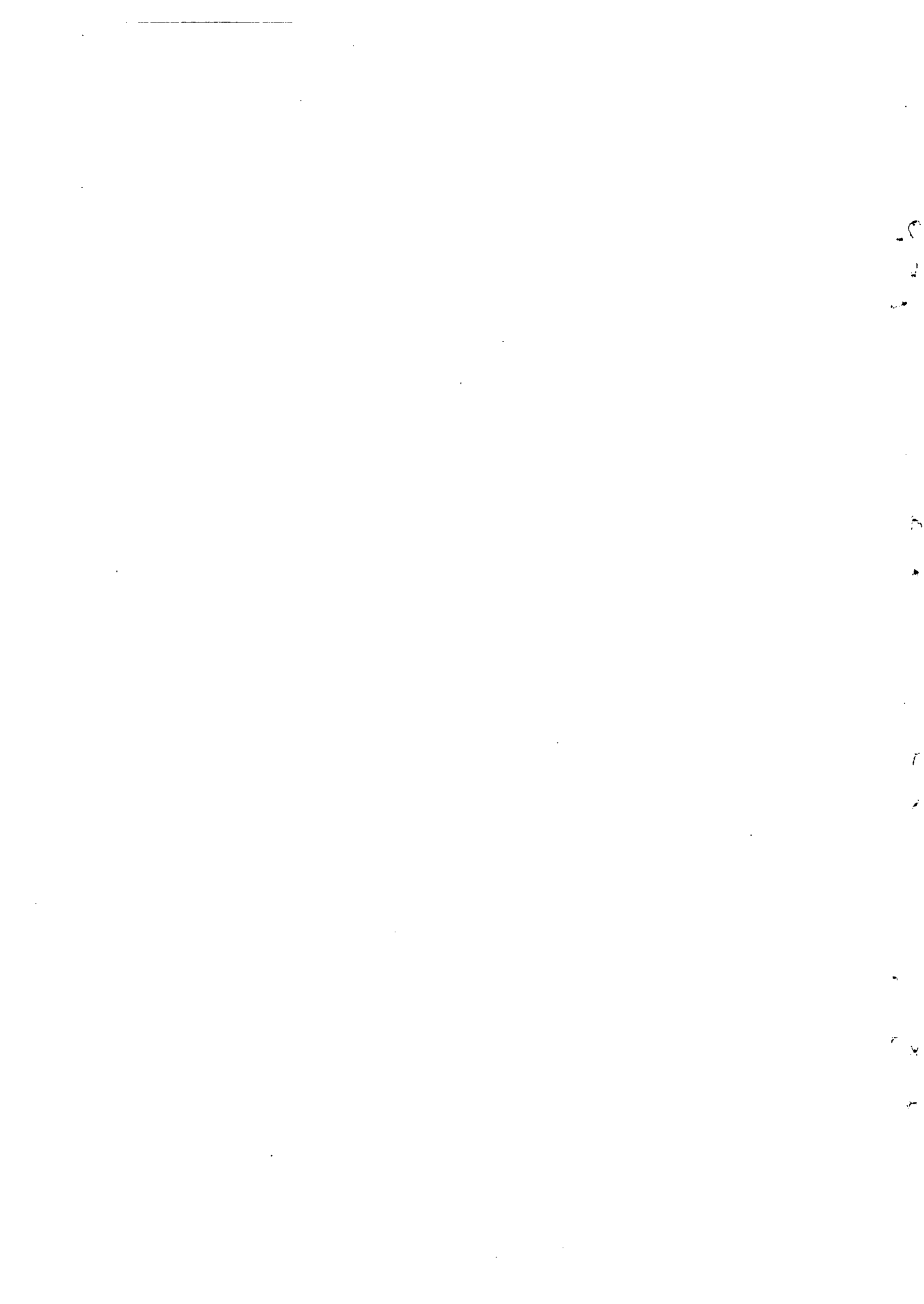


Fig. 1 - Volume de circulation h par unité de temps et volume H à la fin d'une période.



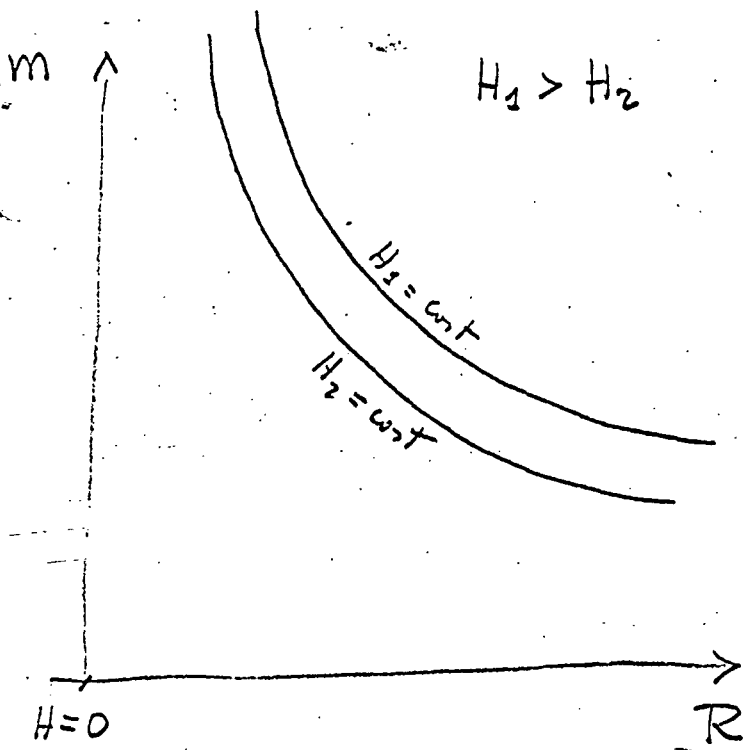


Fig. 2 - Rapport entre charges d'entretien m et de renouvellement R pour un volume de circulation H constant.

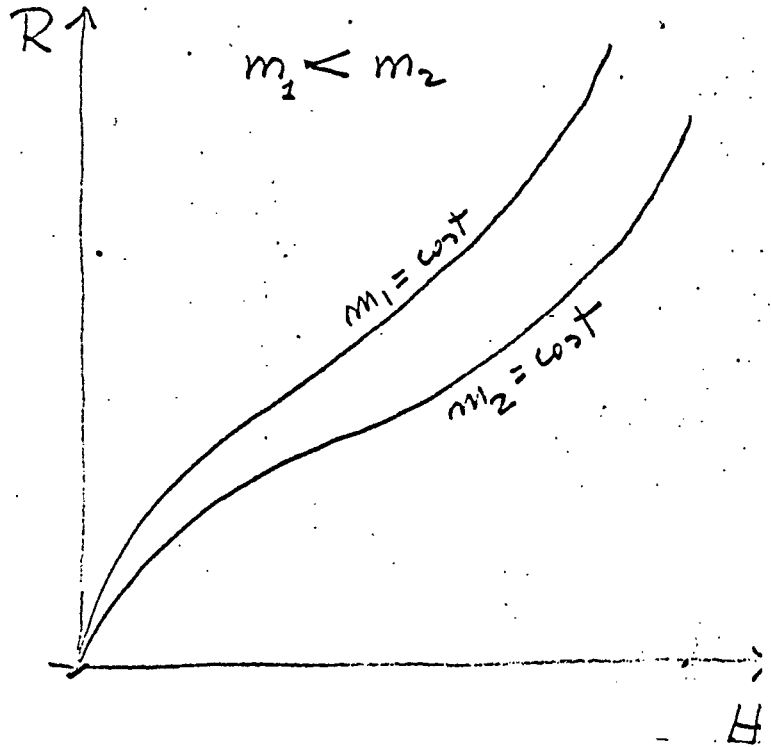


Fig. 3 - Rapport entre charges de renouvellement R et volume de circulation H pour des charges d'entretien constantes.

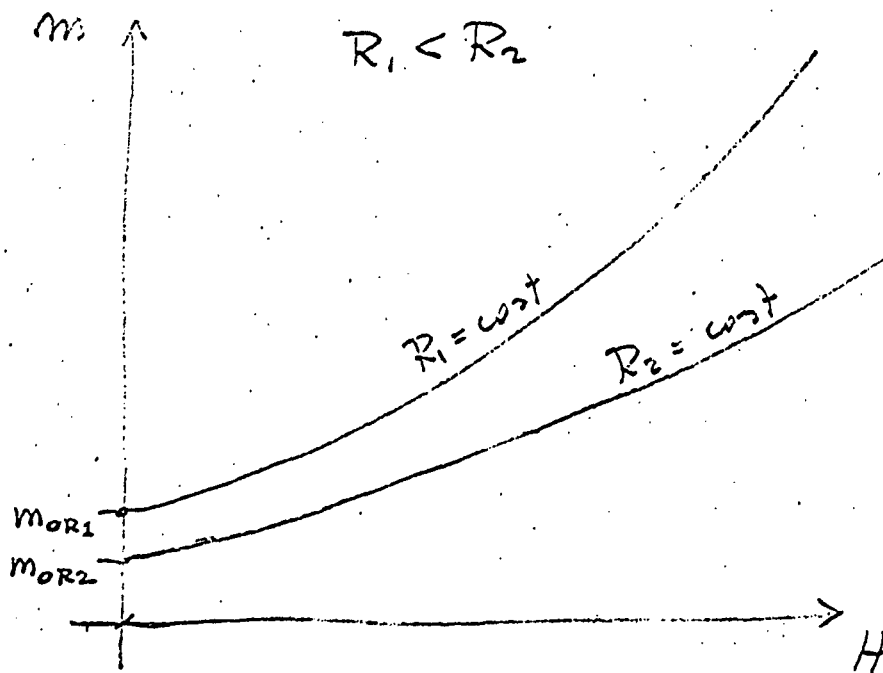
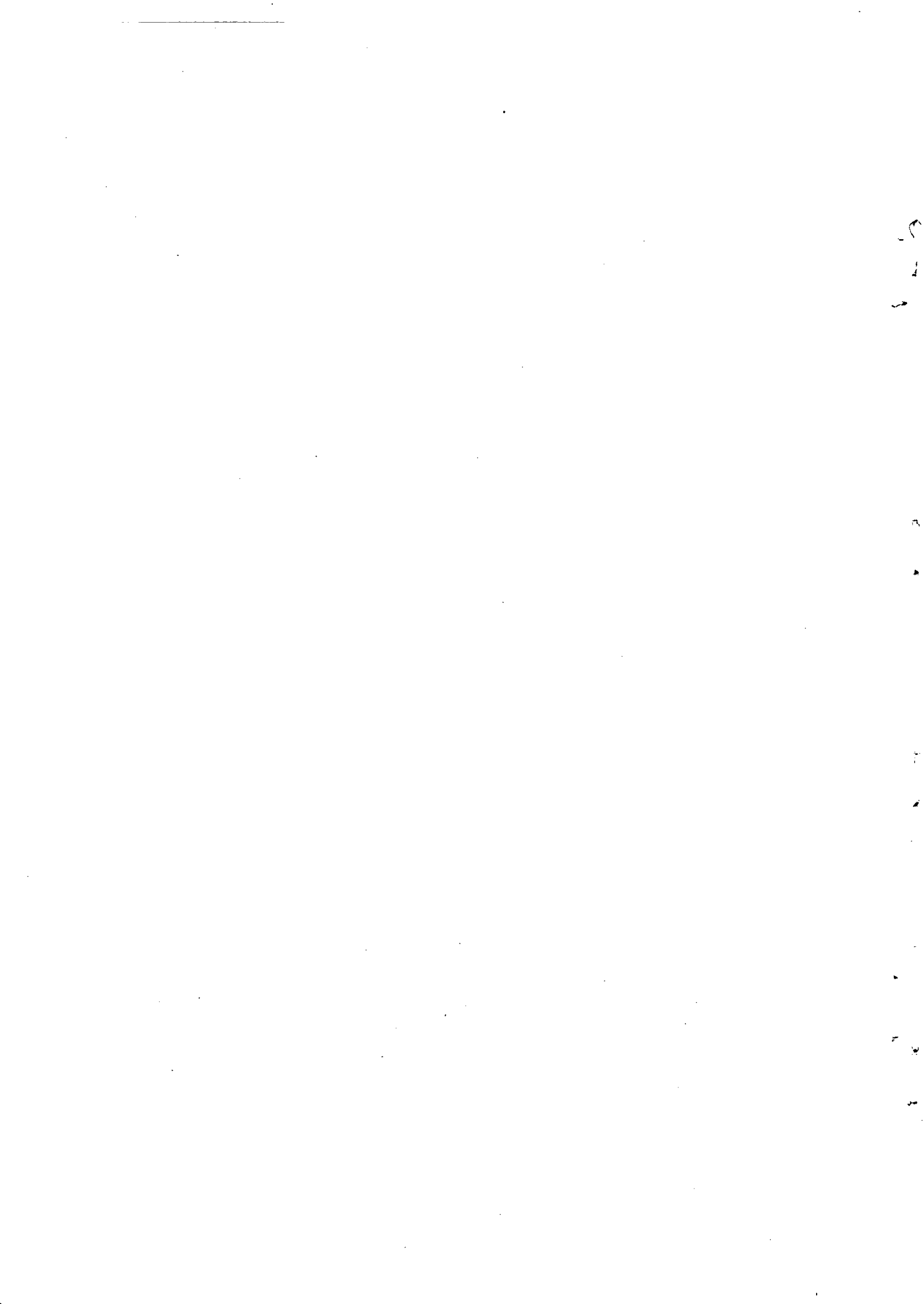


Fig. 4 - Rapport entre les charges d'entretien et le volume de la circulation pour des charges de renouvellement constantes.



Pour la même raison, dans la fig. 3, la courbe supérieure se rapporte aux valeurs les plus faibles de m ($m_1 < m_2$) ;

b) Pour m constant, les besoins de renouvellement croissent avec les volumes :

$$\left\{ \begin{array}{l} m = \text{coût} \\ R = R(H) \end{array} \right. \quad (6)$$

Pour $R > 0$, $\frac{dR}{dH} > 0$ (fig. 3). Pour la même raison, dans la fig. 4, la courbe supérieure se rapporte aux valeurs les plus faibles de R ($R_1 < R_2$).

c) Pour R constant, les besoins d'entretien croissent avec H :

$$\left. \begin{array}{l} R = \text{coût} \\ m = m_{Ro} + m_R(H) \end{array} \right\} \quad (7)$$

Pour $m > 0$, $\frac{dm}{dH} > 0$ (fig. 4). Pour la même raison, dans la figure 2, la courbe supérieure se rapporte aux valeurs les plus élevées de H ($H_1 > H_2$).

3 - Pour autant que l'on ne l'ait pas dit explicitement, il est clair qu'en passant d'un point à l'autre de la surface $S(m, R, H)$, il se peut qu'aussi bien la technique de réalisation de la partie M de l'infrastructure que les dimensions de ses éléments constitutifs restent inchangées ; il se peut, par contre, que la technique mais non les dimensions reste inchangée ; il se peut enfin que la technique elle-même change.

Les différentes techniques de renouvellement et leurs différents dimensionnements possibles sont distingués au moyen d'un indice j ($j = 1 + z$), de sorte que R_j indique les charges de renouvellement (variables avec H et m) relatives à une technique particulière dont les éléments sont dimensionnés de façon bien déterminée. De cette manière, dans les graphiques cités jusqu'à présent qui indiquent R en abscisse ou en ordonnée, il conviendra de supposer définie le long de ces axes (fig. 5) la relation entre chaque valeur générale de R et toutes ses relations possibles avec les différentes techniques et les dimensionnements possibles de chacune d'elles. On constatera ainsi qu'à certaines valeurs de R peuvent correspondre plus d'une possibilité (^{oo}). En outre, si pour chacune d'elles nous pouvons raisonnablement estimer que m varie de façon continue avec R et H , il y a lieu de prévoir, au contraire, que le passage de l'une à l'autre implique des discontinuités, de sorte que les graphiques déjà tracés dans les fig. 2 et 3 devront être modifiés comme dans les fig. 6 et 7. En ce qui concerne la fig. 4 (pour $R = \text{coût}$), il suffira d'observer qu'elle devra comprendre toutes les courbes des $R_j = \text{coût}$, chacune correspondant à une possibilité de construction bien définie.

° °

- 4 - La conséquence de tout ceci est qu'il n'existe pas une seule surface $S(m, R, H)$, mais bien au contraire z surfaces $S_j(m, R_j, H)$, ($j = 1 + z$) ; les solides qu'elles déterminent, tous sectionnés par exemple par des plans $m = \text{coût}$, donnent naissance sur le plan (H, R) (sur l'ordonnée duquel il y a lieu d'indiquer la relation entre R et les différentes possibilités de construction) à une famille de courbes).

(^{oo}) Dans les figures, on suppose qu'à chaque valeur de R correspondent une ou, au maximum, deux possibilités.

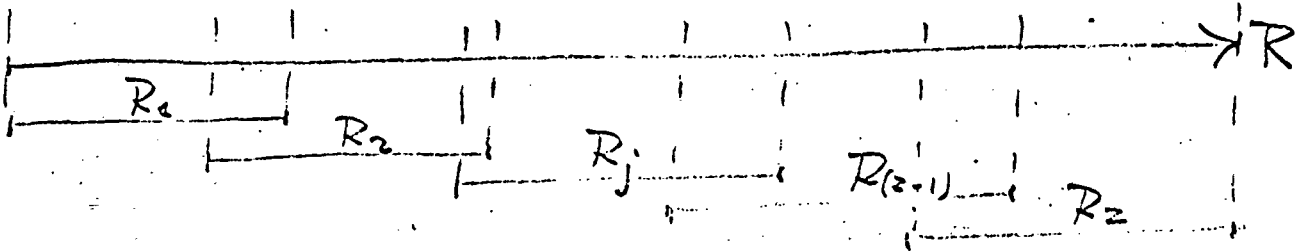


Fig. 5 (- Rapport entre les charges de renouvellement et la technique de construction du revêtement.

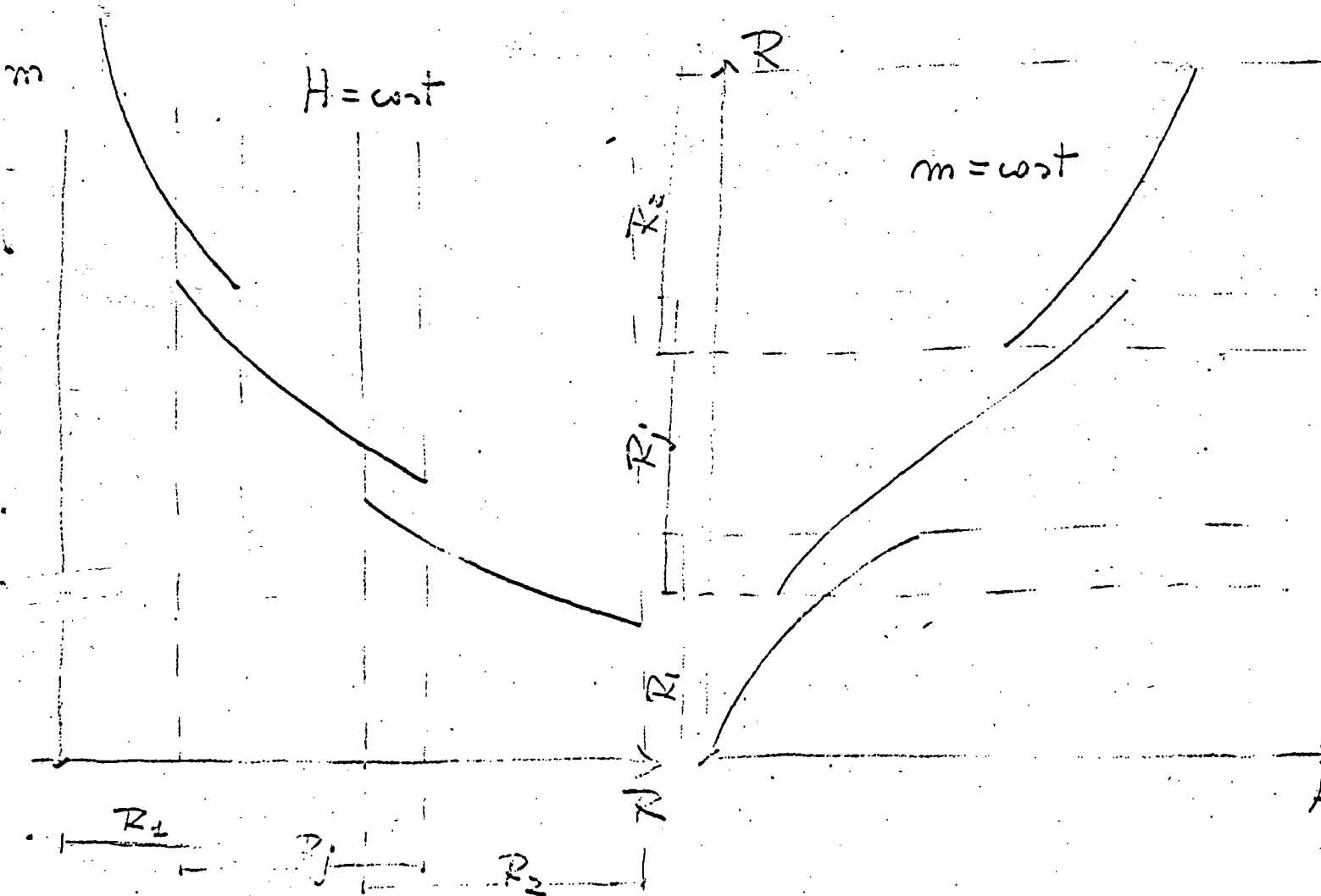
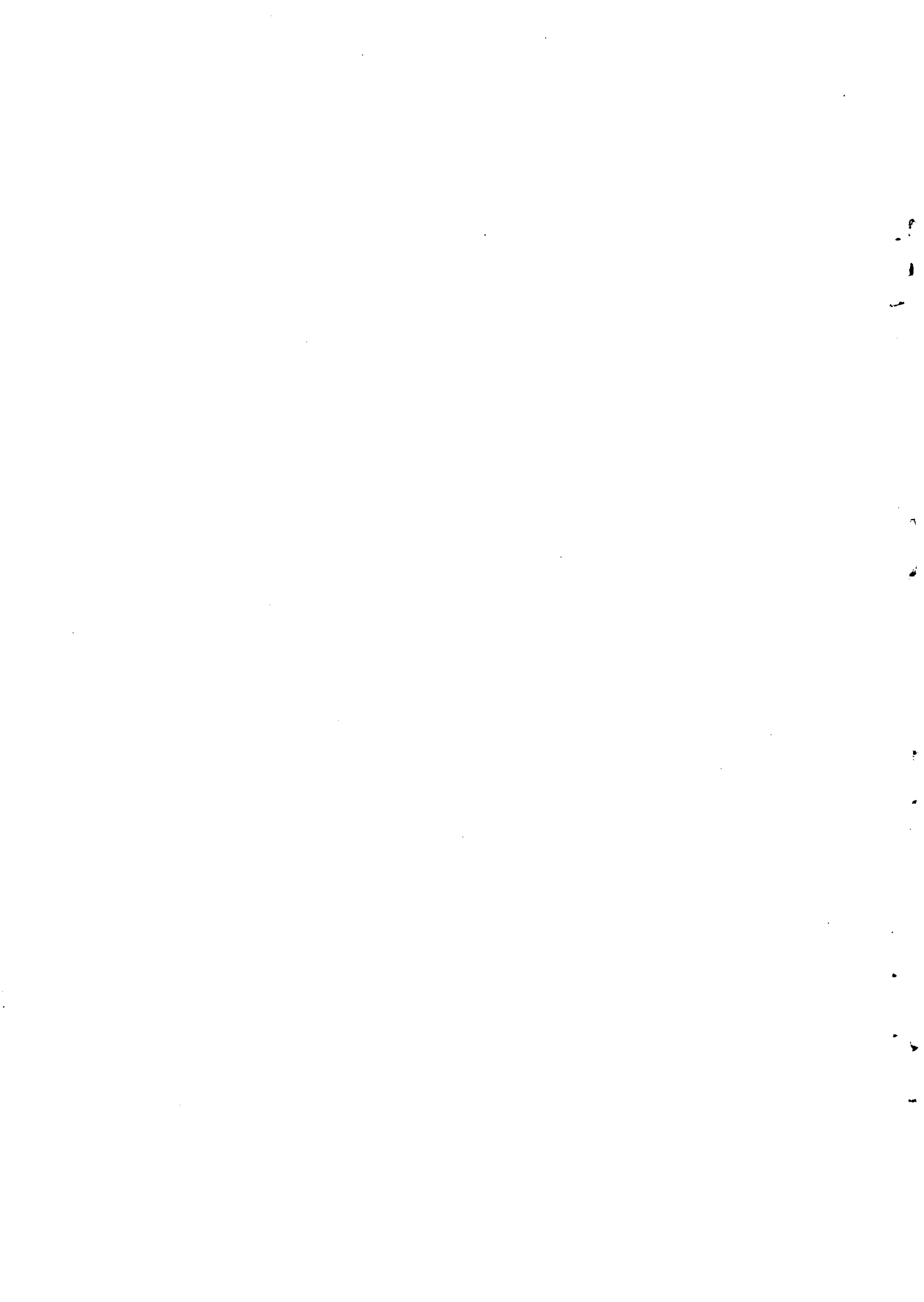


Fig. 6 - Comme la figure 2, en tenant compte ici des différentes techniques de construction.

Fig. 7 - Comme la fig. 3, en tenant compte ici des différentes techniques de construction.



Chacune d'elles sera constituée par un ensemble d'arcs discontinus, de sorte qu'à certaines valeurs de R et à certaines valeurs de H, correspondent plusieurs valeurs de m.

En vue d'approfondir ultérieurement cette idée et de la simplifier - sans d'ailleurs compromettre la valeur générale des considérations qui suivent - nous supposons qu'il n'y a qu'une seule surface S (m,R,H). Dans l'hypothèse où l'on sectionne le solide qu'elle délimite par des plans m = coût, pour chacune des valeurs de m̄ de m on aura :

$$\left. \begin{aligned}
 C_m &= \bar{m}t + R_m \\
 t &= t(H) \\
 \bar{m} &= m_o(R) + m_h(H,R)
 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

de la dernière des fonctions (8) on déduit :

$$R_m = R_m(H) \quad (9)$$

Donc :

$$C_m = \bar{m} t(H) + (R_m)(H) \quad (10)$$

$$\frac{dC_m}{dH} = \bar{m} \frac{dt}{dH} + \frac{dR_m}{dH} \quad (11)$$

Il est clair qu'il existe un nombre infini de courbes de coûts d'usage et de coûts marginaux d'usage de l'infrastructure. Il est également clair que pour une valeur quelconque fixée à l'avance H̄ de H, il existe un nombre infini de valeurs de C et de $\frac{dC}{dH}$.

.../...

Cette variété infinie dépend de la multiplicité des relations qui - en raison de la multiplicité des techniques - lient entre eux les charges d'entretien m , les volumes H , les charges de renouvellement R et la durée t des parties M des infrastructures.

°
° °

5 - Parmi cette infinité de courbes de coûts, il peut être intéressant d'en étudier deux :

- a) celle avec laquelle on obtient le coût minimum d'usage de l'infrastructure; elle est certainement intéressante pour la réalisation d'une politique économique des transports ayant pour objectif l'allocation optimum des ressources ou l'accroissement des productivités marginales ;
- b) celle qui a trait à la situation actuelle d'une infrastructure spécifique en cours d'étude ; la connaissance de ce coût historique comparé avec celui qui a été indiqué à l'alinéa a) pourrait surtout offrir des éléments d'évaluation pour la préparation d'un ordre de priorité des investissements ayant pour objectif d'atteindre la situation optimale, et permettrait également d'établir des comparaisons entre les infrastructures des différents modes de transport.

Quel que soit celui des deux objectifs que l'on poursuit, dans l'un ou l'autre cas, le problème se ramène à tracer des courbes :

$$R \frac{m}{m} = R \frac{m}{m} (H) .$$

Pour l'objectif visé à l'alinéa a), il y aura lieu d'étudier la totalité de ces courbes ; pour l'objectif visé à l'alinéa b), il suffira de tracer la seule courbe relative à la situation étudiée.

.../...

A titre complémentaire, il convient d'observer que, ne connaissant pas a priori la variation effective de la fonction $R_m = R_m(H)$, elle a été tracée au jugé dans la figure 2, avec des coûts marginaux en partie croissants et en partie décroissants bien entendu toujours positifs.

Pour étudier les diverses possibilités, il y a lieu de considérer trois des divers cas de courbe que l'on peut estimer être représentative de R, chacune ayant des coûts marginaux toujours positifs mais constants, ou croissants ou bien décroissants :

1er cas) supposons que R_m représente un coût marginal positif constant ;

par exemple du type :

$$R = a H$$

(droite partant de l'origine des axes) ;

2ème cas) R_m représente un coût marginal décroissant, par exemple du type :

$$R = \sqrt{2nH}$$

(parabole à concavité tournée vers l'axe des H et passant par l'origine des axes) ;

3ème cas) R_m représente un coût marginal croissant, par exemple du type :

$$R = \frac{H^2}{2n}$$

(parabole à concavité tournée vers l'axe des R et passant par l'origine des axes)

.../...

Premier cas

$$C = m \cdot t(H) + aH$$

$$c = \frac{C}{H} = \frac{m}{H} t(H) + a$$

$$\frac{dC}{dH} = m \frac{dt}{dH} + a > 0$$

$$\frac{dc}{dH} = \frac{\frac{d}{dH} \left[\frac{m}{H} \cdot t(H) \right]}{H^2} = \frac{m}{H} \left(\frac{dt}{dH} - \frac{t(H)}{H} \right)$$

$$c - \frac{dC}{dH} = m \left(\frac{t(H)}{H} - \frac{dt}{dH} \right)$$

c'est-à-dire : selon que $\frac{dt}{dH} \gg \frac{t(H)}{H}$, le coût unitaire moyen c sera croissant ou décroissant et, par conséquent, respectivement inférieur ou supérieur au coût marginal.

Deuxième cas

$$C = m \cdot t(H) + \sqrt{2nH}$$

$$c = \frac{C}{H} = \frac{m}{H} t(H) + \sqrt{2n} \cdot H^{-\frac{1}{2}}$$

$$\frac{dC}{dH} = m \frac{dt}{dH} + \frac{1}{2} \sqrt{2n} H^{-\frac{1}{2}} > 0$$

$$\frac{dc}{dH} = \frac{m}{H} \left(\frac{dt}{dH} - \frac{t(H)}{H} \right) - \frac{1}{2} \sqrt{2n} H^{-\frac{3}{2}}$$

$$c - \frac{dC}{dH} = m \left(\frac{t(H)}{H} - \frac{dt}{dH} \right) + \frac{1}{2} \sqrt{2n} H^{-\frac{1}{2}}$$

c'est-à-dire : si $\frac{dt}{dH} < \frac{t(H)}{H}$, le coût unitaire moyen c sera alors décroissant et supérieur au coût marginal (dans le cas contraire, on peut avoir toutes les possibilités).

.../...

Troisième cas

$$C = m \cdot t(H) + \frac{H^2}{2n}$$

$$c = \frac{C}{H} = \frac{m}{H} \cdot t(H) + \frac{H}{2n}$$

$$\frac{dC}{dH} = m \frac{dt}{dH} + \frac{H}{n} > 0$$

$$\frac{dc}{dH} = \frac{m}{H} \left[\frac{dt}{dH} - \frac{t(H)}{H} \right] + \frac{1}{2n}$$

$$c - \frac{dC}{dH} = m \left[\frac{t(H)}{H} - \frac{dt}{dH} \right] - \frac{H}{2n}$$

où : selon que $\frac{t(H)}{H} \gtrless \frac{dt}{dH}$ le coût unitaire moyen c sera croissant ou décroissant ; dans ce dernier cas, il sera en outre inférieur au coût marginal ; (dans le premier cas on peut avoir les deux possibilités).

Si dans les trois cas précités on pose : $h(t) = \text{coût}$, ou $t(H) = \frac{H}{h}$ et $\frac{dt}{dH} = \frac{1}{h}$ on obtient les résultats particuliers suivants :

dans le premier cas : $c = \frac{dC}{dH} = \frac{m}{h} + a = \text{coût}$;

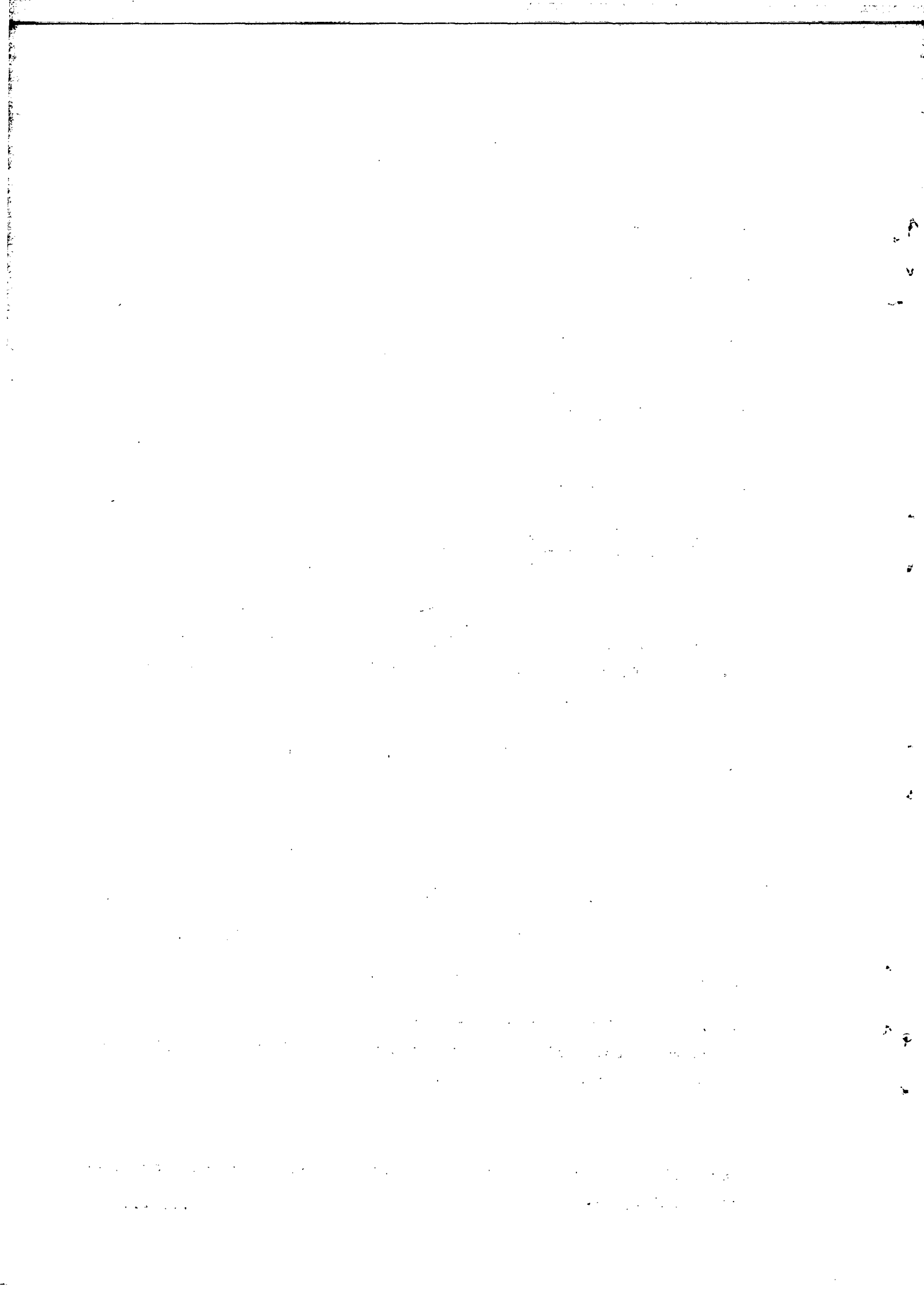
dans le deuxième cas : $\frac{dc}{dH} = -\frac{1}{2} \sqrt{2n} H^{-\frac{3}{2}} < 0$; c'est-à-dire que le coût unitaire moyen est décroissant et, par conséquent, supérieur au coût marginal de la quantité $\frac{1}{2} \sqrt{2n} H^{-\frac{1}{2}}$;

dans le troisième cas : $\frac{dc}{dH} = \frac{1}{2n} > 0$; c'est-à-dire que le coût unitaire moyen est croissant et en même temps inférieur au coût marginal de la quantité

$$-\frac{H}{2n} .$$

Les trois cas particuliers précités sont représentés dans les figures 8 (a, b, c).

.../...



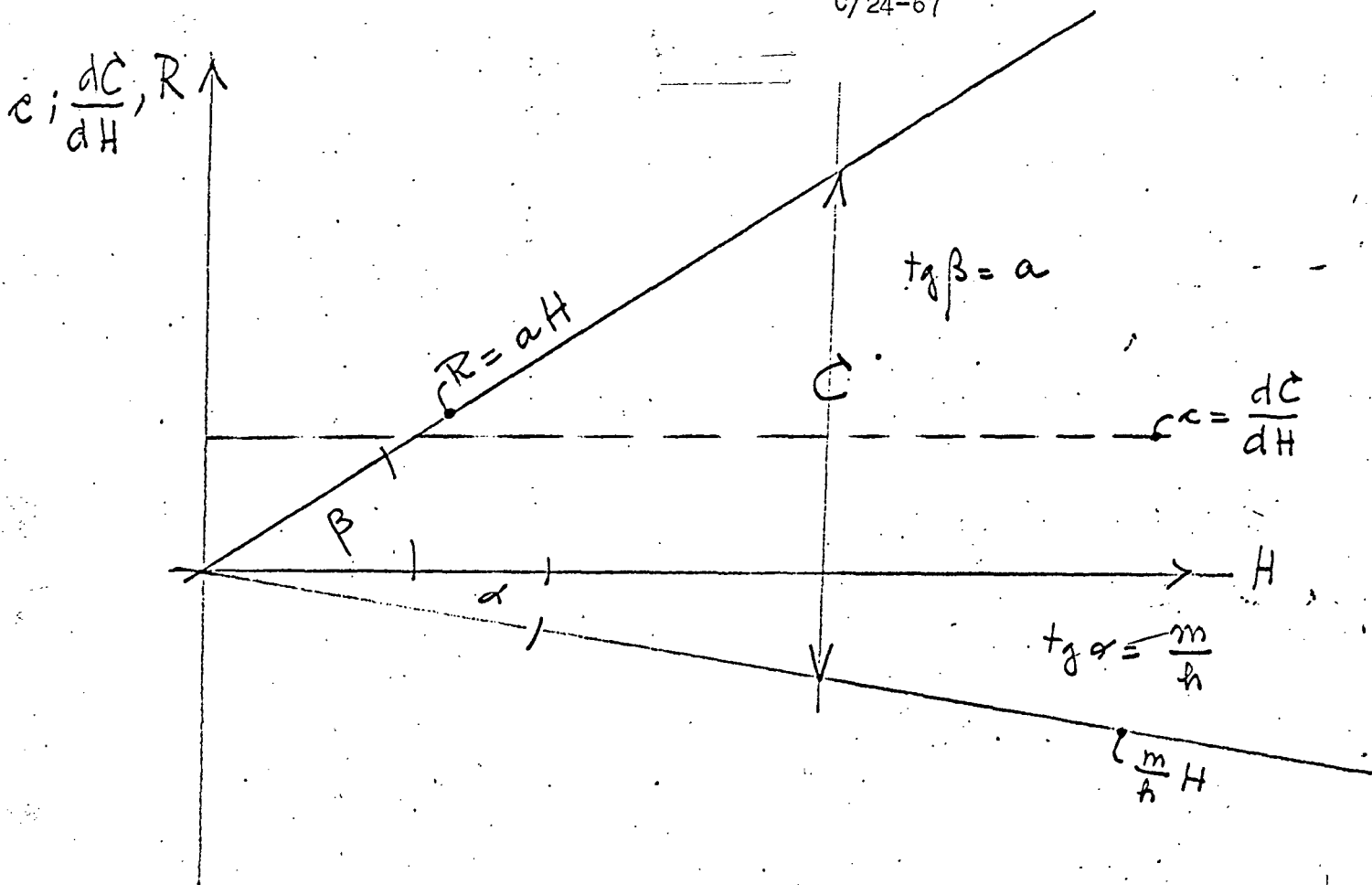
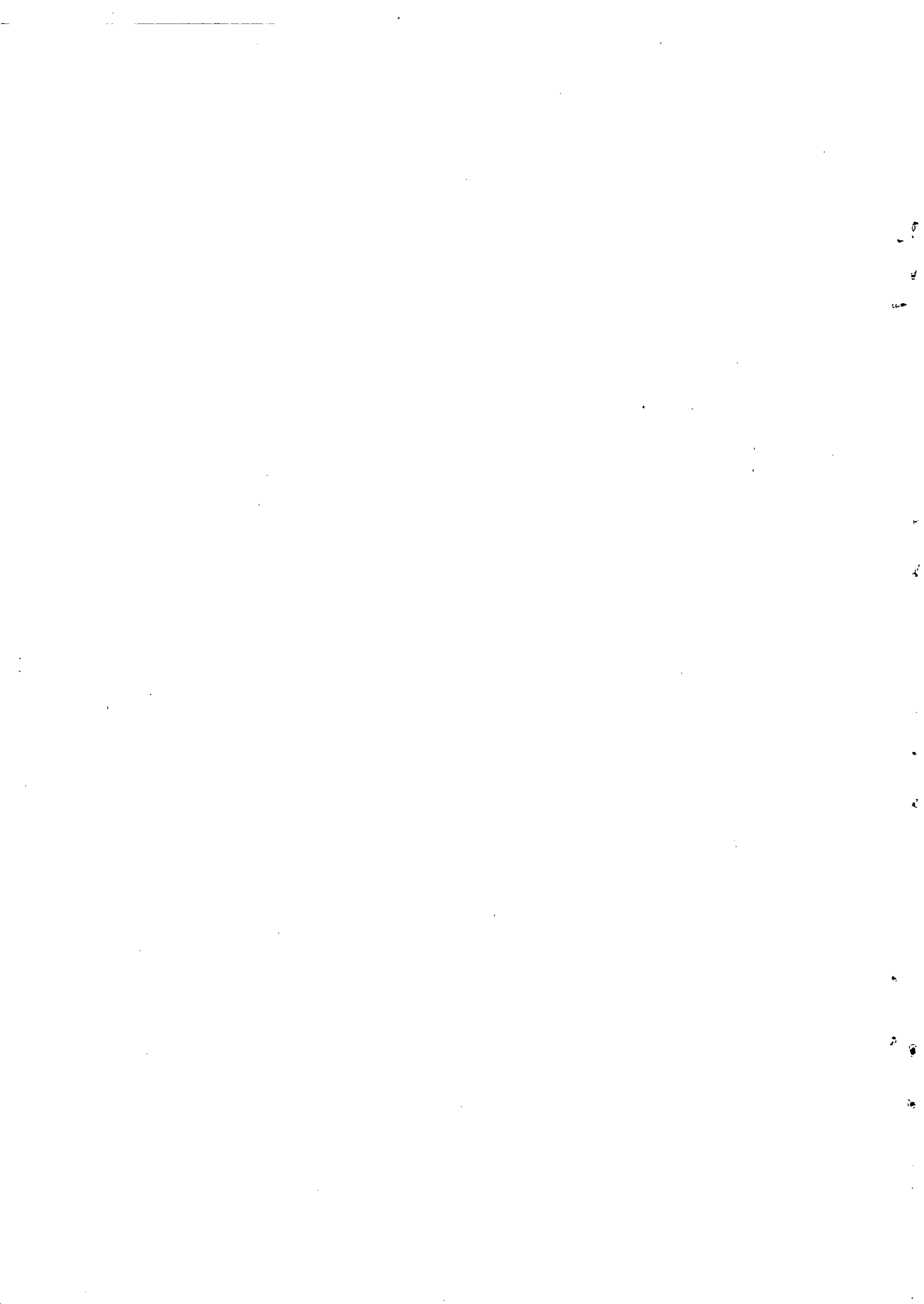


Fig. 8a - Coût d'usage, coût unitaire d'usage et coût marginal d'usage dans l'hypothèse où les charges de renouvellement sont des coûts marginaux constants et dans le cas particulier où le volume de la circulation par unité de temps est constant.



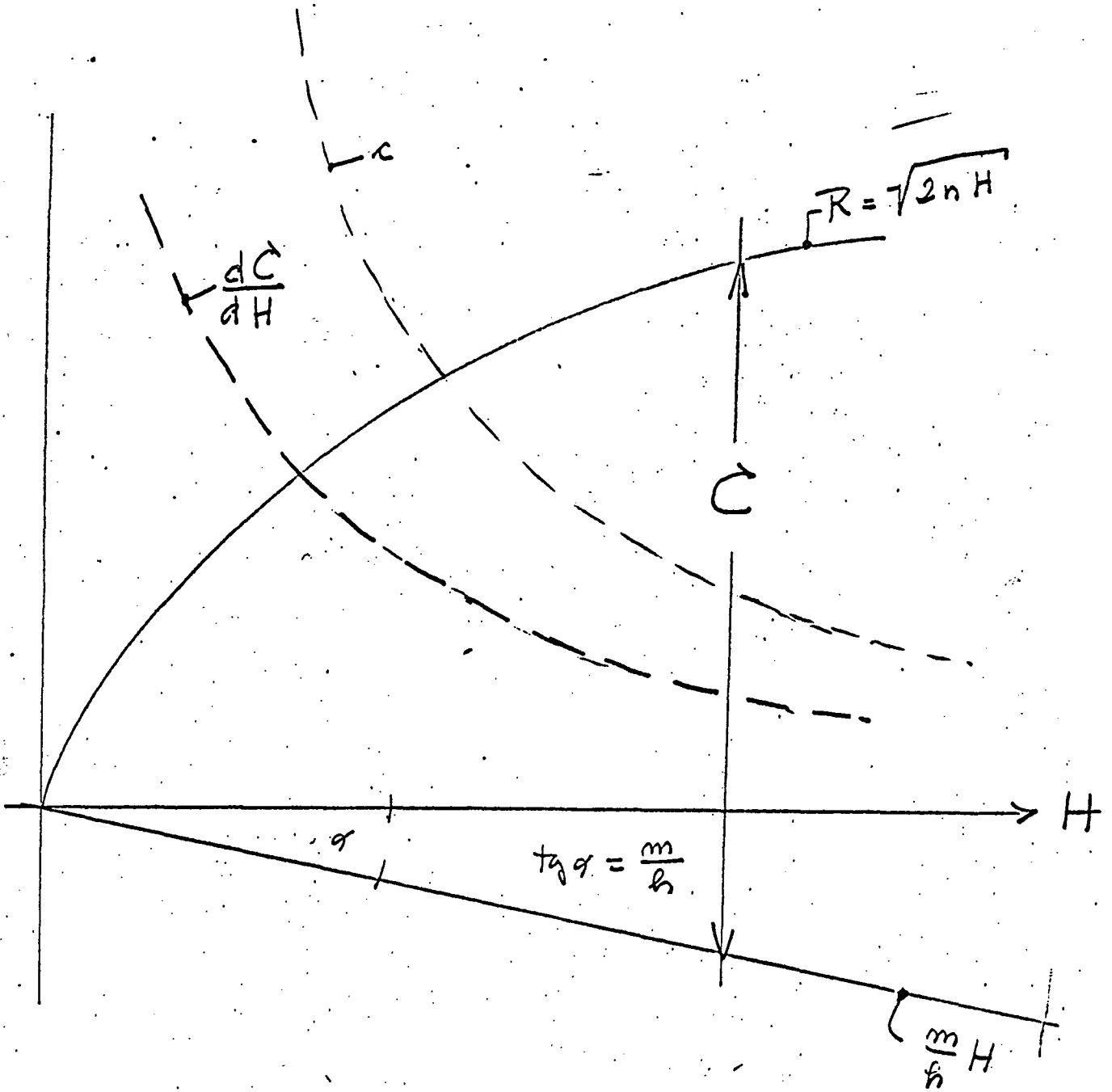


Fig. 8b - Coût d'usage, coût unitaire d'usage et coût marginal d'usage dans l'hypothèse où les charges de renouvellement sont des coûts marginaux décroissants et dans le cas particulier où le volume de la circulation par unité de temps est constant.



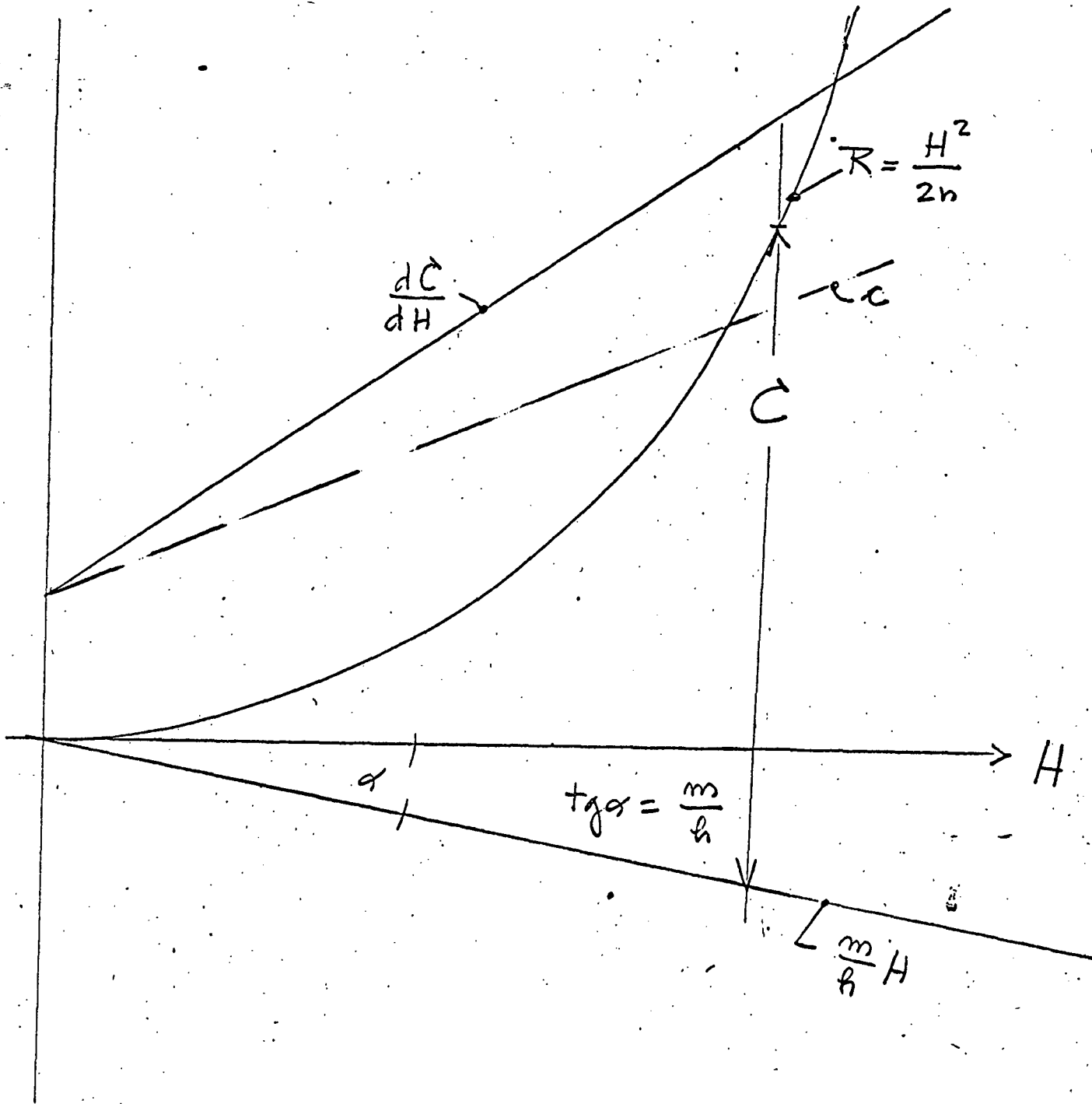
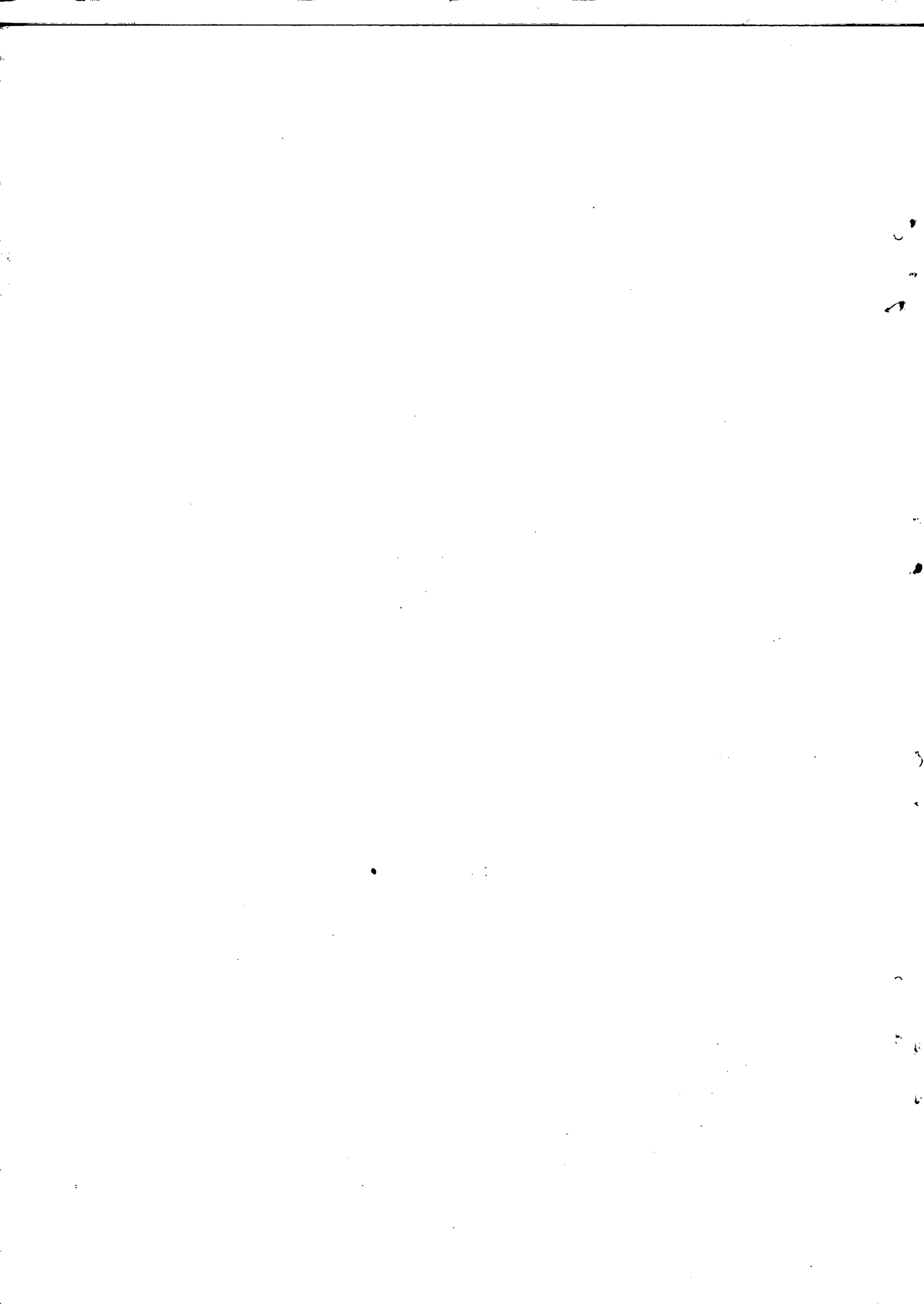


Fig.8c - Coût d'usage, coût unitaire d'usage et coût marginal d'usage dans l'hypothèse où les charges de renouvellement sont des coûts marginaux croissants et dans le cas particulier où le volume de la circulation par unité de temps est constant.



6 - On a supposé que les opérations d'entretien et de renouvellement maintiennent inchangée l'aptitude de l'infrastructure à résister aux charges. En réalité tout renouvellement comporte, en pratique, des opérations plus ou moins importantes de renforcement en prévision des augmentations du trafic.

Si le rapport $\frac{\Delta H}{\Delta R}$ entre les augmentations probables des charges et celles qui résultent des renouvellements est tel que l'on puisse considérer la courbe $C_m = C_m(H)$ comme encore continue et pouvant être dérivée de H - c'est une condition qui se vérifie dans la pratique courante (par exemple quand on conserve la même structure pour la surface de roulement, en se limitant uniquement à augmenter dans une faible mesure les dimensions des éléments constitutifs) - dans ce cas, les raisonnements énoncés jusqu'à présent restent valables.

Si, par contre, les interventions techniques sont telles qu'elles permettent à l'infrastructure des prestations nettement différentes, la courbe C_m ne peut plus être considérée comme continue et il faut faire abstraction du coût d'usage qui était celui de l'infrastructure étudiée ; il y aura lieu de considérer le coût d'usage de la nouvelle infrastructure et qui résulte des interventions techniques profondes effectuées.

Néanmoins, cela ne signifie pas que le domaine de ces interventions techniques profondes ne doit pas être étudié en vue de connaître l'importance des coûts d'usage et des coûts marginaux d'usage dont dépend en fin de compte la politique économique des transports.

On ne peut, en effet, assimiler le renouvellement - même sur des bases entièrement nouvelles - des structures de la surface de roulement (et même aussi une adaptation raisonnable des dimensions de la chaussée) (°°°) avec les interventions sur les infrastructures

(°°°) Toutes ces interventions ayant pour objet de doter les infrastructures routières existantes d'un niveau minimum tolérable de qualité par rapport aux exigences de la circulation motorisée qui les utilise aujourd'hui.

et qui ont pour objet de doter le territoire de nouveaux moyens de transport adaptés aux exigences de la technique, de l'économie et de l'allocation des activités sur le territoire et qui comportent des problèmes de renouvellement substantiel, même au besoin de tracé, sinon tout simplement de création de nouvelles infrastructures.

°
° °

- 7 - Jusqu'à présent, on a supposé que la circulation peut être représentée par une seule variable indépendante H, exprimée en termes de "nombre de véhicules par unité de temps" ou de "nombre de tonnes brutes par unité de temps".

Si l'on pouvait démontrer que le passage de z véhicules de T tonnes chacun a le même effet - pour le but qui nous intéresse - que le passage de T véhicules de z tonnes, l'étude effectuée jusqu'à présent serait valable également pour des circulations non homogènes, de toute façon composites, à condition que H soit exprimé en "nombre de tonnes brutes par unité de temps".

Attendu que l'on a des raisons motivées de ne pas juger valable l'hypothèse précitée, la circulation devra être représentée par divers H_i (une pour chacune des catégories selon lesquelles on peut raisonnablement, quoique de façon conventionnelle, la diviser) et pour chacune desquelles on peut estimer valable l'hypothèse avancée jusqu'à présent pour la totalité de la circulation H.

Nous aurons :

$$H = \sum_{i=1}^n H_i$$

.../...

Pour chaque catégorie (d'indice i) prise séparément, on pourra définir des surfaces iota du type $S_j (n, R, H)$, mentionnées au paragraphe 3.

Si l'on suppose encore que l'on ait :

$$j = 1 + z$$

et qu'en outre

$$i = 1 + n$$

le nombre de surfaces S_{ji} à considérer sera zn .

Si on a de nouveau recours à l'hypothèse de travail simplificatrice en ce qui concerne la relation entre R et les R_j , les surfaces S_i se réduiront à n . Chacune d'elles, selon la méthode adoptée jusqu'ici, permet de déterminer une courbe $C_i = C_i(H_i)$ du coût (minima) d'usage de l'infrastructure en fonction des volumes de la catégorie i composant la circulation, dans l'hypothèse, d'ailleurs, qu'elle soit la seule à utiliser l'infrastructure.

Dès lors, il convient d'introduire l'hypothèse de la superposition des effets : c'est-à-dire que le coût d'usage de l'infrastructure utilisée par n catégories de circulation soit égal à la somme des n coûts d'usage de chacune de ces catégories prise séparément.

Supposons que l'on connaisse l'importance \bar{H}_i de chaque H_i qui compose H , pour une valeur donnée \bar{H} . Si chacune d'elles utilisait seule l'infrastructure, on pourrait, avec la méthode présentée jusqu'à présent, déterminer le coût d'usage historique actuel de l'infrastructure ou encore le coût minimal ainsi que la technique j_i qui permettrait de la réaliser. Et, en général, il n'y a aucune raison pour que la technique j_s qui remplit cette condition pour la composante \bar{H}_s le fasse également pour une autre composante quelconque \bar{H}_q .

.../...

Cela signifie que la technique de construction qui donnerait lieu au coût minimal d'usage pour chacune des catégories de circulation prise séparément est, en général, différente d'une catégorie à l'autre.

Il y a lieu, par conséquent, de rechercher la technique j_w (qui, dans le cas du coût actuel historique, est déjà connue) qui, entre toutes, est en mesure de donner le coût d'usage le plus faible pour toutes les catégories prises, non plus séparément, mais ensemble.

Cela signifie qu'il convient de chercher (dans le cas du coût historique actuel, autrement la valeur) le minimum de la fonction :

$$\left[\sum_{i=1}^n C_i \right]_j \quad (12)$$

dans laquelle j , dans le cas du coût historique actuel, est constant; autrement elle doit varier de façon à comprendre toutes les techniques.

Compte tenu du fait que le nombre n de catégories selon lesquelles, en pratique, on peut subdiviser la circulation est très limité (également parce qu'il est difficile de définir pour chacune les fonctions 5, 6 et 7), ce problème se simplifie sensiblement. On obtient ainsi :

- a) la détermination d'un seul point de la courbe du coût (ou du coût minimum) pour l'ensemble des catégories H_i constituant le volume \bar{H} ;
- b) dans le cas de la recherche du coût minimum, la détermination d'une seule technique de construction j_w définie par le fait qu'en liaison avec elle on a cherché le minimum de la fonction (12).

.../...

Or, en faisant varier \bar{H} et, en conséquence, ses composants, il sera possible de tracer la courbe $C = C(H)$ qui pourra être dérivée par rapport à H - selon des méthodes analytiques ou graphiques plus ou moins approximatives - pour en tirer le coût marginal d'usage.

Pour obtenir les coûts marginaux d'usage de chaque H_i , il sera nécessaire de dériver par rapport à H_i , celle des diverses courbes $C_i = C_i(H_i)$ qui est relative à la technique de construction j_w commune à tout le volume H .

- En réalité, si l'on prend l'hypothèse simplificatrice selon laquelle la circulation peut être subdivisée en deux grandes catégories :

- voitures particulières (parmi lesquelles on peut également englober, avec des coefficients d'équivalence appropriés, les véhicules à moteur à deux roues et les véhicules à moteur de type léger pour le transport de marchandises), ci-dessous désignées par le symbole VP ;

- véhicules industriels lourds ; symbole PL ;

on pourra procéder de la façon suivante :

a) on détermine la courbe $h_{vp} = h_{vp}(t)$ pour laquelle on suppose que le nombre de véhicules de symbole VP peut varier dans le temps ; intégrée elle donnera la fonction $H_{vp} = H_{vp}(t)$;

b) on détermine comme en a), la courbe $h_{pl} = h_{pl}(t)$ et, par conséquent, la fonction $H_{pl} = H_{pl}(t)$;

c) pour toute valeur de la variable indépendante t , on additionne les valeurs correspondantes de H_{vp} et H_{pl} ; on obtient ainsi la valeur du volume total H ;

.../...

- d) on fixe un assez grand nombre de valeurs du coût d'entretien annuel qui doivent rester constantes, de sorte que le coût total d'entretien obtenu en relation avec chaque valeur de la variable indépendante t s'obtient avec une fonction linéaire.

Les résultats visés aux alinéas a) à d) peuvent être réunis dans un seul graphique (fig. 9 dans laquelle, pour simplifier le tracé, les valeurs de m sont seulement au nombre de deux).

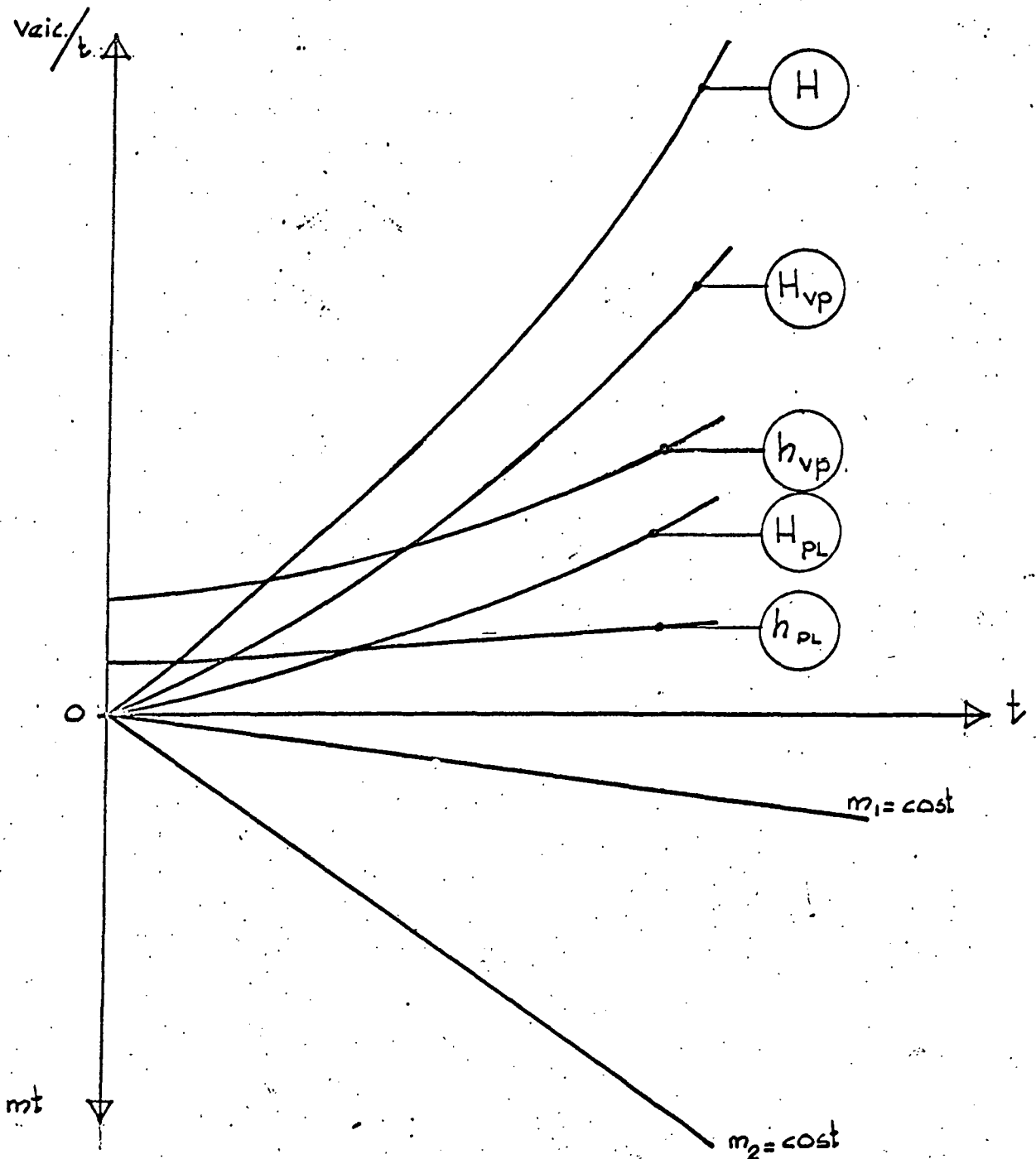
- e) on détermine ensuite (figures 10a et 10b) les graphiques du type déjà indiqué dans la figure 7, respectivement un graphique pour les véhicules VP et un autre pour les véhicules PL ; les figures 10a et 10b sont - pour des raisons de simplicité - tracées en se référant aux deux seules possibilités techniques différentes (à chacune desquelles correspond une seule valeur de m) ;

- f) on est désormais en mesure de construire la courbe $C = C(H)$, point par point. Dans la figure 11, on prend H comme variable indépendante et on en reporte sur les abscisses les valeurs dans le domaine qui se rapporte à celui donné par la figure 9. De cette figure, on déduit pour chaque valeur de H les différentes valeurs correspondantes m_t , chacune correspondant à une valeur de m , et on les reporte dans la figure 11 comme ordonnées correspondant à la valeur de H de laquelle elles découlent.

Fig. 9 -

On reporte en ordonnées, en fonction du temps t ;

- a) sur l'axe orienté vers le haut, les valeurs du trafic annuel des voitures particulières et des véhicules industriels et les fonctions intégrales correspondantes
- b) sur l'axe orienté vers le bas, les charges d'entretien (la charge annuelle étant supposée constante).





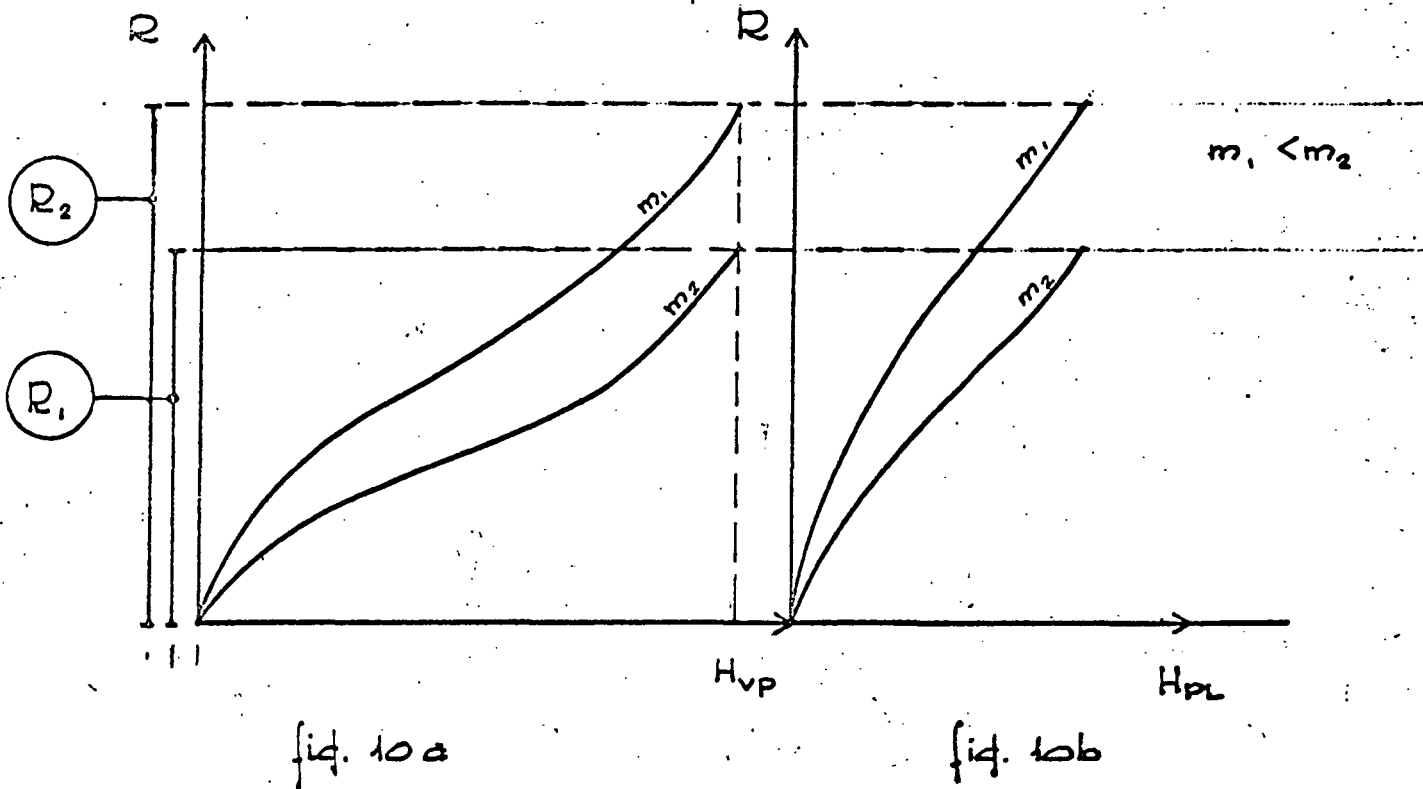


Fig. 10a : Dans la figure 10a) on reporte - en fonction du nombre de voitures particulières - les charges de renouvellement pour deux techniques différentes de réalisation des surfaces de roulement, dont chacune exige des charges annuelles d'entretien que l'on suppose constantes ;

Fig. 10b : Dans la fig. 10b), on reporte les mêmes grandeurs en fonction des volumes de circulation des seuls véhicules industriels

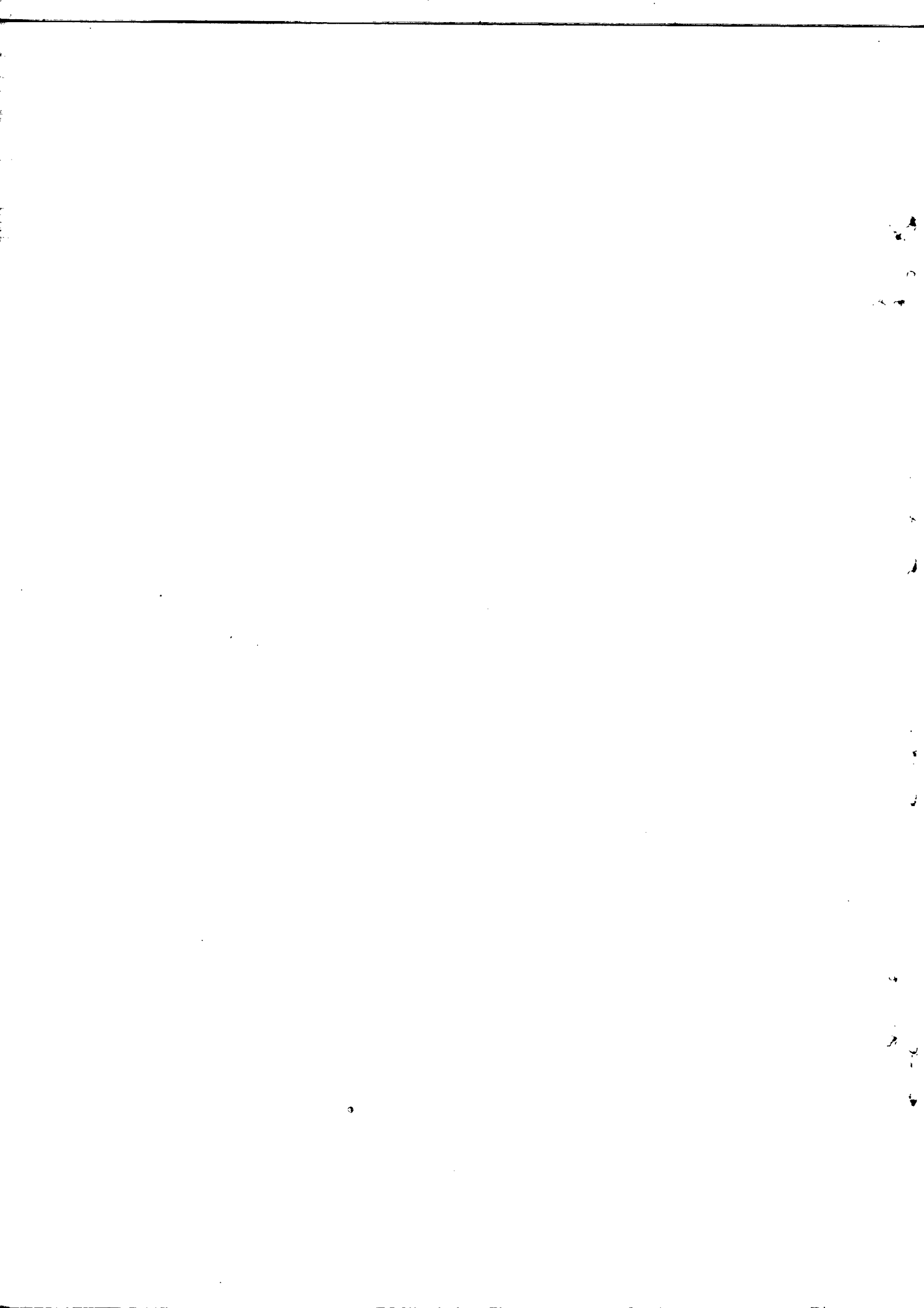
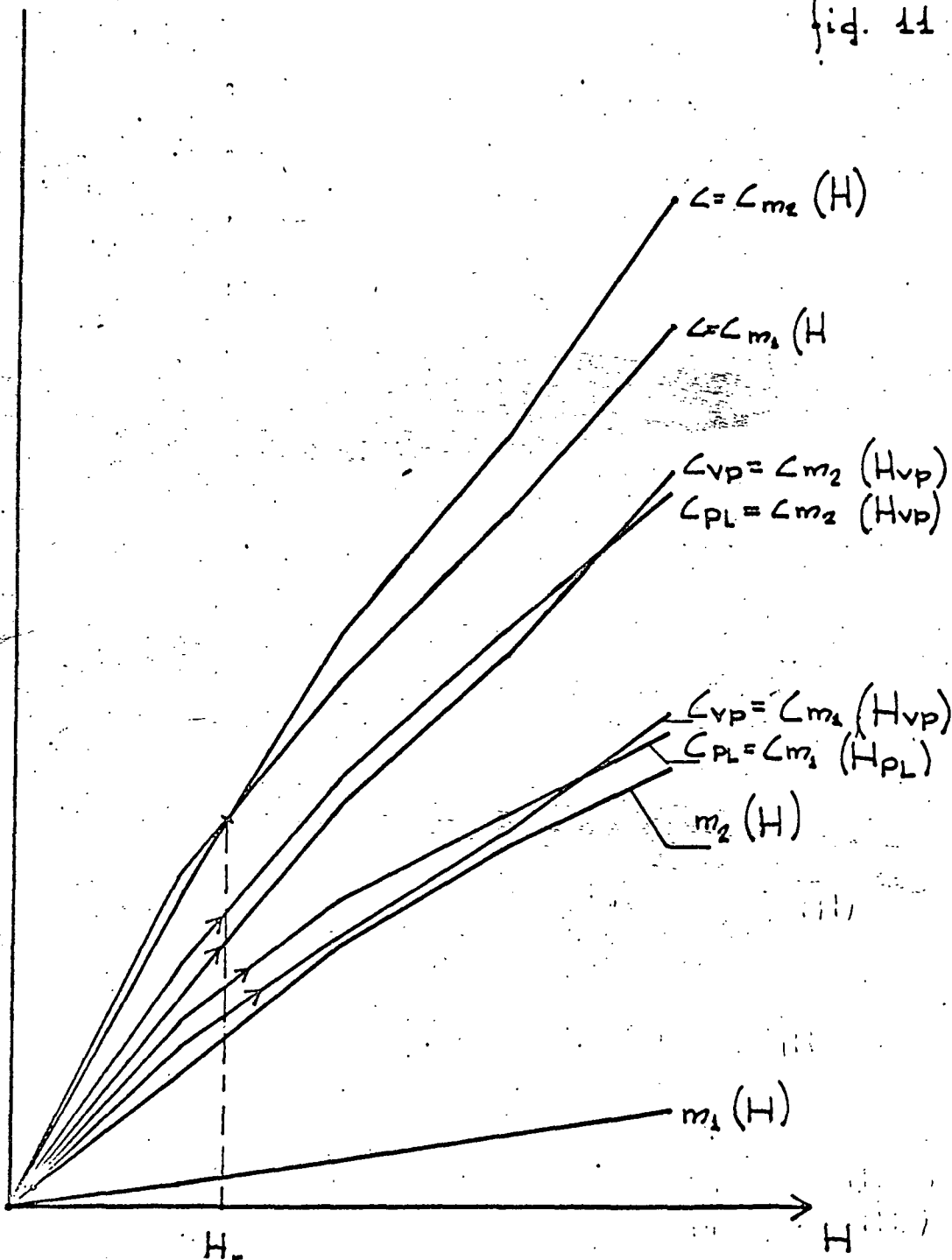
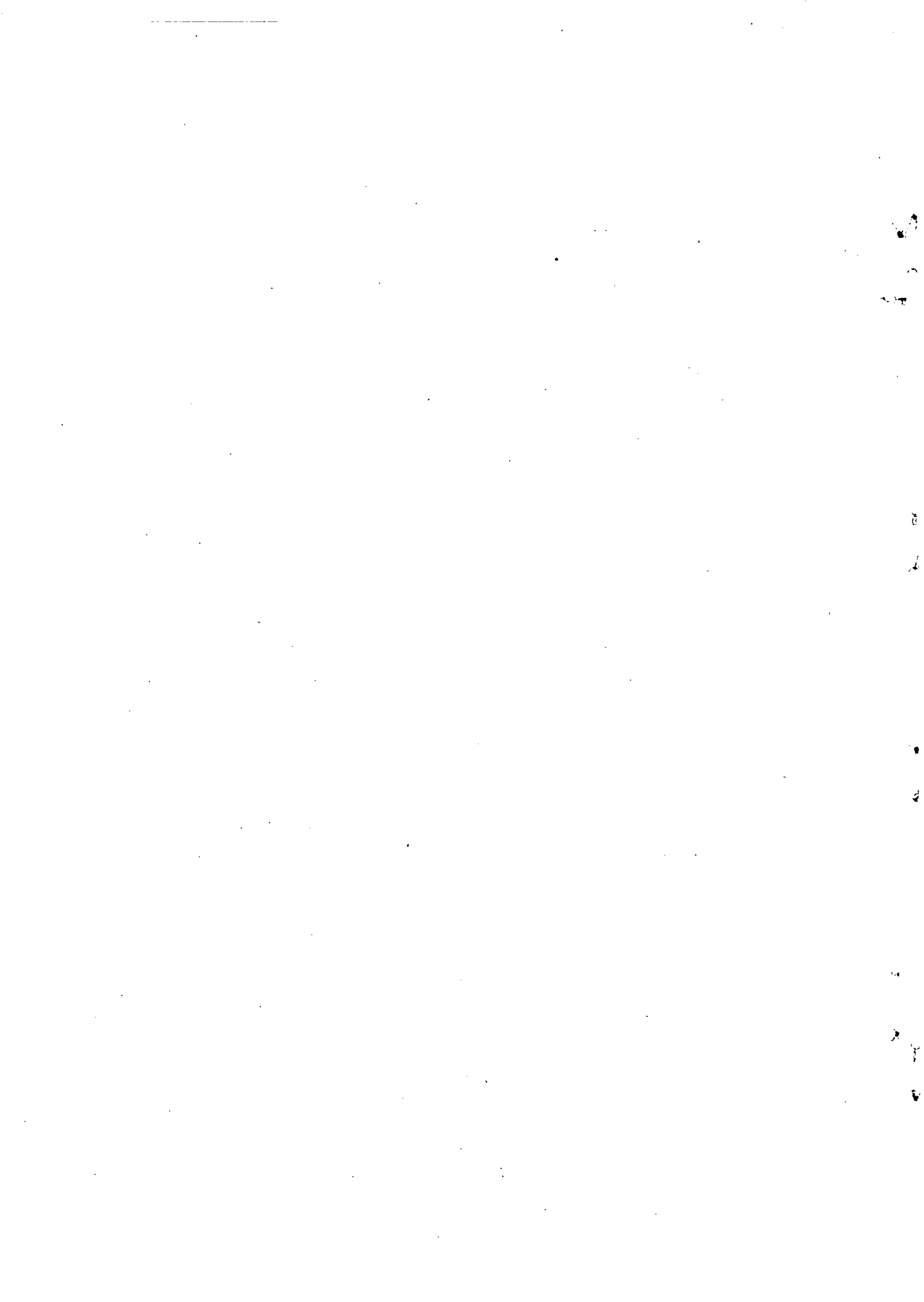


Fig. 11 En fonction du volume total H de la circulation (jugé égal à la somme du nombre de voitures particulières H_{VP} et de celui des véhicules industriels H_{PL} que l'on déduit de la figure 9), on reporte les charges d'entretien $m_1(H)$ et $m_2(H)$ (que l'on déduit de la figure 9) relatives à chacun des deux procédés techniques de réalisation des surfaces de roulement, ainsi que, séparément, les coûts d'usage correspondants C_{VP} (somme du coût de l'entretien et de celui de renouvellement - tirés de la figure 10a) pour la circulation des seules voitures particulières et C_{PL} pour la circulation des seuls véhicules industriels (dont les charges de renouvellement sont tirées de la fig. 10b) ; enfin toutes ces charges, relatives à chacun des deux procédés techniques déjà mentionnés, sont additionnées pour déterminer le coût total d'usage C_{m1} et C_{m2} dans chacun des deux cas. Il s'ensuit que, pour les valeurs inférieures de H_r , il y a lieu de préférer le procédé "indice 1" ; pour les valeurs supérieures, l'autre procédé.

fig. 11





Ensuite, de cette figure 9, on déduit la subdivision de H en H_{VP} et H_{PL} ; de sorte que des figures 10a et 10b, pour chaque valeur de m, on déduit les R correspondants à ajouter, en ordonnée, à la figure 11, aux valeurs déjà reportées de mt.

En répétant ces opérations pour chaque valeur de R, le lieu géométrique des points que donne la somme (mt + R) pour une même valeur de m, forme une courbe $C_{\bar{m}} = C_{\bar{m}}(H)$ qui peut être l'unique courbe disponible concernant la technique utilisée. Mais on peut également obtenir l'ensemble de ces courbes en faisant varier \bar{m} , c'est-à-dire l'ensemble des courbes $C=C(H)$, dont la connaissance permet de déterminer - dans le domaine de variabilité de H - la courbe obtenue par une série d'arcs appartenant chacun à une courbe différente $C_{\bar{m}} = C_{\bar{m}}(H)$ indiquant le coût d'usage minimum C. La dérivée de l'unique courbe du coût historique ou celle du coût minimum est le coût marginal d'usage.

Les opérations présentées jusqu'à présent pour le tracé des graphiques de la figure 11 permettent de déterminer les courbes des coûts d'usage des seuls VP ou des seuls PL et, par conséquent, aussi de les dériver.

Dans la figure 11 sont tracées (en les tirant, comme on l'a dit des fig. 9, 10a et 10b, selon les hypothèses simplificatrices déjà citées) les courbes suivantes :

- courbe de $m_1(H)$ obtenue à partir de m_1 de la figure 9 ;
- " " $m_2(H)$, cf. supra ;
- " $C_{VP} = C_{m_1}(H_{VP})$ obtenue en ajoutant à $m_1(H)$ la valeur R (m_1, H_{VP}) tirée de la figure 10a ;
- " $C_{PL} = C_{m_1}(H_{PL})$ obtenue en ajoutant à $m_1(H)$ la valeur R (m_1, H_{PL}) tirée de la figure 10b ;
- " $C = C_{m_1}(H)$, obtenue en ajoutant à $m_1(H)$ les valeurs R (m_1, H_{VP}) et R (m_2, H_{PL}) ;
- " $C_{VP} = C_{m_2}(H_{VP})$; $C_{PL} = C_{m_2}(H_{PL})$ et $C = C_{m_2}(H)$ obtenue selon les procédés susmentionnés.

.../...

Pour les volumes compris entre 0 et H_r , le coût d'usage le plus bas s'obtient avec la technique R_1 et la valeur annuelle d'entretien constante m_2 ; les valeurs de $H > H_r$ s'obtiennent avec la technique R_2 et la valeur m_1 .

Calcul du nombre d'essieux équivalents
de 13 T contenus dans 1.000 véhicules pris au
hasard sur les routes

On classera les véhicules routiers en trois catégories indiquées dans le tableau ci-joint, qui donne en outre la fréquence d'apparition de chacune de ces catégories sur la route.

	<u>Proportion</u>
Véhicules légers	830
Camions de charge utile comprise entre 1 et 3 T	50
Camions de charge utile supérieure à 3 T	120
Total	<u>1.000</u>

1. Véhicules légers

Ces véhicules à deux essieux pèsent en moyenne 800 kg; dans une population de 1.000 véhicules, ils fournissent en moyenne

$$830 \times 2 = 1.660 \text{ essieux de } 400 \text{ kg.}$$

Le nombre correspondant d'essieux équivalents de 13 T est pratiquement nul.

2. Camions de charge utile comprise entre 1 et 3 T

Ces véhicules sont au nombre de 50 dans une population totale de 1.000 et comportent chacun deux essieux.

Leur poids total est en moyenne de 4 T.

.../...

Leur contribution sera donc de 100 essieux de 2 T chacun et le nombre total d'essieux équivalents de 13 T sera :

$$100 \times \left(\frac{2}{13}\right)^4 \text{ c'est-à-dire pratiquement nul.}$$

3. Camions de charge utile supérieure à 3 T

Ce sont les plus nocifs pour la résistance des routes; en outre leurs caractéristiques sont très diverses. Il convient donc d'en faire une analyse détaillée.

Cette analyse est rendue possible grâce à une enquête effectuée par le Service d'études et de recherches de la circulation routière. Cette enquête par sondage a déterminé la fréquence d'apparition des différents camions de charge utile supérieure à 3 T selon leur poids total en charge autorisé et selon le nombre et la configuration de leurs essieux.

La configuration des essieux est repérée au moyen des silhouettes. Le tableau suivant indique les silhouettes rencontrées, ainsi que la répartition moyenne du poids total en charge entre les différents essieux; cette répartition résulte à la fois de dispositions réglementaires et de considérations mécaniques d'équilibrage des poids.

<u>Silhouette 1</u>	Camion à deux essieux simple	Poids total en charge réparti pour 68 % sur l'essieu arrière, 32 % sur l'essieu avant
<u>Silhouette 2</u>	Camion ayant 1 essieu simple à l'avant et 1 essieu tandem à l'arrière	Poids total en charge réparti pour 77 % sur l'essieu tandem arrière, 23 % sur l'essieu avant
<u>Silhouette 3</u>	Tracteur à deux essieux tirant 1 semi-remorque à 1 essieu	Poids total en charge réparti pour 41 % sur l'essieu de la semi-remorque, 41 % sur l'essieu arrière du tracteur, 18 % sur l'essieu avant du tracteur

<u>Silhouette 4</u>	Tracteur à deux essieux tirant une semi-remorque à 1 essieu tandem	Poids total en charge réparti pour 31 % sur l'essieu tandem de la semi-remorque, 31 % sur l'essieu arrière du tracteur, 18 % sur l'essieu avant du tracteur
<u>Silhouette 7</u>	Camion à deux essieux tirant une remorque à deux essieux	Poids total en charge réparti pour 23 % sur chacun des essieux de la remorque, 37 % sur l'essieu arrière du camion, 17 % sur l'essieu avant du camion.

La connaissance du poids total en charge d'un camion et de sa silhouette permet de déterminer le nombre d'essieux équivalents de 13 T qu'il comporte.

C'est ainsi qu'un camion de silhouette 1 et de poids total en charge de 19 T aura ses deux essieux chargés, le premier à :

$$19 \times 0,68 = 13 \text{ T}$$

et le deuxième à :

$$19 \times 0,32 = 6 \text{ T.}$$

Il lui correspondra un nombre d'essieux équivalents de 13 T :

$$\frac{(13)^4}{(13)} + \frac{(6)^4}{(13)}.$$

Il est donc possible, à partir des statistiques qui donnent la répartition des véhicules par silhouette et par poids total en charge, de déterminer le nombre d'essieux équivalents contenus dans un lot de 120 véhicules.

Ce nombre est de 54.

.../...

4. Récapitulation

En récapitulant les résultats obtenus pour les véhicules légers, les camions de charge utile comprise entre 1 et 3 T et les véhicules de charge utile supérieure à 3 T, on obtient le nombre d'essieux équivalents contenus dans 1.000 véhicules pris au hasard sur les routes. Ce nombre est de 54.

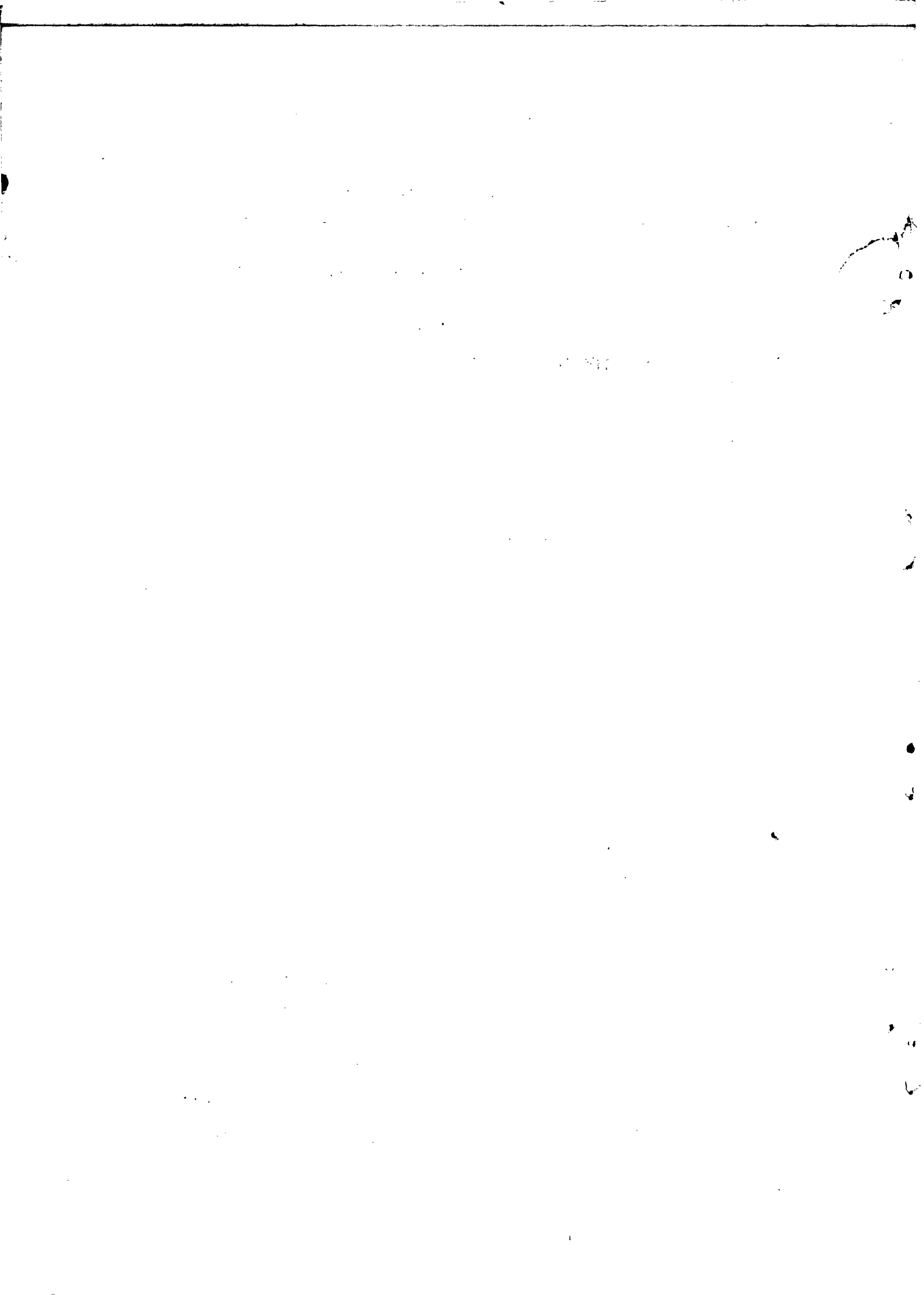
On fait également apparaître facilement le nombre d'essieux équivalents que comporte chaque type de véhicule.

Nombre d'essieux équivalents contenus dans un véhicule du type :	:	:	:
Véhicule léger	:	0	:
Camion de charge utile entre 1 et 3 T	:	0,001	:
Véhicules de charge utile supérieure à 3 T de poids total en charge P	:	:	:
Silhouette 1	:	1,04 $\frac{(P)^4}{19}$:
Silhouette 2	:	1,28 $\frac{(P)^4}{26}$:
Silhouette 3	:	2,04 $\frac{(P)^4}{32}$:
Silhouette 4	:	1,22 $\frac{(P)^4}{35}$:
Silhouette 7	:	1,32 $\frac{(P)^4}{35}$:

Nota : Ces calculs sont effectués à partir des valeurs nominales des poids des essieux et des véhicules, et non à partir de leurs valeurs réelles. Il y a évidemment une différence entre les deux, car les véhicules sont rarement chargés à leur poids nominal; en fait, il sont tantôt en surcharge (cas d'infraction) et tantôt en sous-charge. Mais les renseignements statistiques dont on dispose

montrent que dans l'ensemble, le coefficient de chargement est à peu près le même d'un type de véhicule à l'autre. Il est donc justifié, si, comme c'est le cas ici, on ne s'intéresse qu'à des équivalences entre véhicules, de s'en tenir à des valeurs nominales; le coefficient (mal connu) qui permet de passer des valeurs nominales aux valeurs réelles, n'intervient pas puisqu'il affecte de la même manière les différents véhicules.

.../...



Calcul du coût marginal de renouvellement

Pour calculer ce coût, on déterminera d'abord les recettes que rapporterait son application, puis en divisant ces recettes par le nombre d'essieux équivalents de 13 T, on en déduira la charge de l'essieu de 13 T.

Dans ce but, considérons d'abord le cas d'une seule route; compte tenu de l'évolution du trafic annuel $q(t)$ que celle-ci doit subir, on établit pour elle une politique optimale de renouvellement, se traduisant par l'application d'épaisseur

$$e_0 \quad e_1 \quad \dots \quad e_n \text{ aux dates } T_0 \quad T_1 \quad \dots \quad T_n.$$

Cette politique a été fixée en France par une "Instruction provisoire sur le renforcement des chaussées souples" qui conduit à effectuer des renouvellements, d'une durée de vie moyenne de 10 ans, dont l'épaisseur est donnée en fonction du trafic à partir des lois⁽¹⁾

$$\log W = 12,67 - 3,25 \log d_1$$

et
$$e = 50 \log \frac{d_1}{d_0}$$

où : W trafic total équivalent cumulé, calculé sur la base d'une durée de vie de 10 ans, le trafic croissant linéairement de 0,10 par an.

d_1 déflexion après renforcement

d_0 déflexion avant renforcement

e épaisseur d'enrobés à appliquer.

Une variation fictive $d_g(t)$ du trafic de l'année t entraînerait une modification du programme optimum et c'est un résultat classique de la théorie de l'optimum économique que tous les procédés permettant de s'adapter à cette modification sont également bons.

(1) Dont la tabulation a été donnée dans le corps du rapport, page 19.

Ceci posé, considérons deux cas :

1° La modification a lieu avant la date T_0 du premier renouvellement; alors celui-ci devra être avancé de la durée dT , telle que :

$$dT = \frac{dq(t)}{q(T_0)}$$

En outre, le premier renouvellement, d'épaisseur initiale c_0 , sera à modifier de telle manière qu'il puisse supporter le trafic qui s'écoulera entre $T_0 - dT$ et T_1 : si on appelle W le trafic total entre T_0 et T_1 , le trafic entre $T_0 - dT$ et T_1 sera égal à :

$$W + q(T_0) dT = W + dq(t)$$

Or, l'épaisseur de renforcement e est liée au trafic total par des relations :

$$\log W = 12,67 - 3,25 \log d_1$$

et
$$c_0 = 50 \log \frac{d_1}{d_0}$$

où W : trafic total que supportera la chaussée entre le premier et le deuxième renforcement

d_1 : déflexion après renforcement

d_0 : déflexion avant renforcement.

On en tire aisément par différentiation

$$de_0 = 6,7 \frac{dq(t)}{W}$$

et la variation de dépense actualisée à l'année t s'écrit, p étant le coût de l'cm d'épaisseur d'enrobés et j le taux d'actualisation :

$$pe_0 \exp j(t - T_0) - p(e_0 + de_0) \exp j(t - T_0 - dT)$$

le coût marginal est alors

$$c(t) = p \left(\frac{6,7}{W} + j \frac{e_0}{q(T_0)} \right) \exp j(t - T_0)$$

.../...

Or, on prévoit une croissance du trafic linéaire de 0,10, donc
 $W = 15 q (T_0)$.

On en déduit la recette qu'entraînerait la perception de ce coût marginal :

$$c (t) \times q (t) = p \left(\frac{6,7}{15} + j e_0 \right) \frac{q (t)}{q (T_0)} \exp j (t - T_0)$$

2° Si la modification $d_q (t)$ a lieu après le renforcement, on pourra s'y adapter en augmentant légèrement l'épaisseur de ce renforcement, de façon qu'il permette à la route de supporter entre T_0 et T_1 , le trafic cumulé total nouveau égal au précédent W , augmenté de $d_q (t)$. Il faut pour cela augmenter l'épaisseur e_0 de de_0 telle que :

$$de_0 = 6,7 \frac{dq (t)}{W}$$

avec $W = 15 q (T_0)$.

Le coût marginal correspondant sera :

$$c (t) = \frac{p de_0 \exp j (t - T_0)}{dq (t)}$$

et sa perception rapporterait :

$$p \times \frac{6,7}{15} \frac{q (t)}{q (T_0)} \exp j (t - T_0)$$

3° L'utilisation de ces résultats permettra de déterminer un coût marginal différent selon la structure de la chaussée.

a) Pour les chaussées de type traditionnel, appelons $g (t_i)$ la dépense totale de renforcement qu'il sera nécessaire de consacrer à cette catégorie de chaussées à l'année u , et $q (u)$ le trafic total annuel qu'elles supporteront à l'année u .

.../...

Le produit à l'année t $R(t)$ du coût marginal de renforcement sera alors pour elles composé de deux termes :

$$R(t) = R_1(t) + R_2(t)$$

- $R_1(t)$ = renforcement futur :

$$R_1(t) = \sum_{u=t}^{\infty} g(t_i) \left[j + \frac{6,7}{15 e_0} \right] \frac{q(t)}{q(u)} \exp j(t-u).$$

Ce produit sera à répartir sur le trafic de l'année t , chaque véhicule étant chargé proportionnellement au nombre d'essieux équivalents qu'il comporte, l'équivalence entre essieux à prendre en compte étant celle adoptée pour les chaussées de type traditionnel :

- $R_2(t)$ renforcements passés :

$$R_2(t) = \sum_{u=0}^{u=t-i} g(u) \left[\frac{6,7}{15 e_0} \right] \times \frac{q(t)}{q(u)} \times \exp j(t-u).$$

Ce produit $R_2(t)$ sera à répartir sur le trafic de l'année t , chaque véhicule étant chargé proportionnellement au nombre d'essieux équivalents qu'il comporte, mais cette fois-ci, puisqu'il s'agit de chaussées déjà renforcées, l'équivalence entre essieux à prendre en compte est celle relative aux chaussées revêtues d'un tapis d'enrobés épais.

b) Pour les chaussées déjà revêtues d'un tapis d'enrobés épais, si $h(u)$ représente la dépense totale de renforcement qu'il est nécessaire d'y consacrer à l'année u et $r(u)$ le trafic total annuel qu'elles supportent à l'année u , le produit $R(t)$ du coût marginal de renforcement sera alors pour elles :

$$R(t) = \sum_{u=t}^{\infty} h(u) \left[j + \frac{6,7}{15 e_0} \right] \frac{r(t)}{r(u)} \exp j(t-u) + \sum_{u=0}^{u=t-i} h(u) \frac{6,7}{15 e_0} \frac{r(t)}{r(u)} \exp j(t-u).$$

.../...

Cette charge totale sera répartie entre la circulation de l'année t , chaque véhicule étant compté proportionnellement au nombre d'essieux équivalents qu'il comporte, l'équivalence étant celle adoptée pour les chaussées revêtues d'un tapis d'enrobés.

c) Enfin, les chaussées à couche de base rigidifiée et les chaussées en béton sont quasi inexistantes sur les sections de routes retenues.

L'application de ces formules nécessite la connaissance de $q(u)$, $r(u)$, $g(u)$, $h(u)$ et e_0 .

$q(u)$ et $r(u)$, trafics totaux de l'année u respectivement sur les routes de type traditionnel et sur les routes revêtues d'un tapis d'enrobés épais, sont aisés à déterminer à partir de la connaissance des trafics de l'année 1965 et de la loi d'évolution des trafics dans le temps.

$g(u)$ et $h(u)$ ont pu être estimés sur la base des mesures de déflexion effectuées au cours des années 1965 et 1966; ces mesures, réalisées de manière assez systématique et détaillée, ont permis de ranger les routes en 3 catégories.

- celles pour lesquelles un renforcement s'imposait dès maintenant. La nature et l'importance de ce renforcement a alors pu être déterminée avec assez de précision ;

- celles pour lesquelles il n'était pas nécessaire d'intervenir dès maintenant, mais dont l'état (déflexion moyenne et dispersion des déflexions autour de cette moyenne) n'était pas totalement satisfaisant ;

- enfin, celles qui sont actuellement en parfait état, et dont le renforcement n'aura à intervenir qu'à une époque lointaine.

Sans attacher une trop grande précision à ce classement, on peut néanmoins penser qu'il ne s'écarte pas trop de la réalité.

On a enfin réparti les dépenses du premier groupe sur les 5 premières années, celles du deuxième groupe sur les 5 années suivantes, celles du troisième groupe sur les 5 dernières années, aboutissant ainsi à un programme d'une durée totale de 15 ans s'échelonnant de 1968 à 1982.

L'échéancier de dépenses ainsi obtenu à l'allure indiquée dans le tableau suivant sur lequel on a également porté l'évolution de la circulation.

Année	Dépenses de renouvellement en millions de F	Indice de la circulation
1968	17	100
1969	16	112
1970	15	125
1971	14	135
1972	13	146
1973	11	156
1974	10	171
1975	8	184
1976	6	194
1977	5	204
1978	5	214
1979	5	225
1980	5	236
1981	5	243
1982	5	250

Comme pour les dépenses d'entretien des chaussées, il n'a pas été possible de séparer les sections en sous-sections homogènes. On a donc fait là aussi un calcul global unique qui conduit aux recettes suivantes pour les huit années futures.

.../...

Année	Recette R (t) en Millions de F.
1968	8,2
1969	8,5
1970	8,7
1971	9,0
1972	9,4
1973	9,6
1974	10,5
1975	11,0

Le réseau considéré supportait en 1965 environ 950.000.000 v.km. Il en supportera environ 30 % de plus en 1968, soit environ 1.250.000.000 v.km.

Ce renseignement, combiné à la connaissance du nombre d'essieux équivalents contenus dans 1.000 véhicules (voir annexe 5) et à l'évolution future de la circulation, permet de déterminer pour chaque année le coût marginal de l'essieu de 13 T; on aboutit au tableau suivant, dont chaque case est obtenue en divisant le produit de l'année en cause par le nombre d'essieux équivalents de cette année, nombre lui-même obtenu en multipliant le trafic total de l'année, exprimé en véhicules-kilomètres par le nombre moyen d'essieux équivalents de 13 T que comporte un véhicule.

Coût marginal de l'essieu de 13 T en France par km

Années	
1968	0,122
1969	0,115
1970	0,103
1971	0,098
1972	0,095
1973	0,093
1974	0,092
1975	0,091

