

VII/76/74-F

Orig. : N

INSTITUUT VOOR WEGTRANSPORTMIDDELEN TNO

(INSTITUTE FOR ROAD VEHICLES TNO)

rapport n° : 03-2-10004 / modifié

date : juin 1974

La consommation d'énergie des moyens de transport

Etude comparative

Auteurs : Ir. E.J. Tuininga

Ir. R.C. Rijkeboer

Ing. P. van Sloten

Vu : Ir. P.D. v.d. Koogh

TABLE DES MATIERES

	Page
Résumé	3
Conclusions	5
Introduction	17
A. Transport de personnes	21
1. Généralités	21
2. Transport urbain de personnes	25
3. Transport interurbain de personnes	37
4. Effets des caractéristiques techniques des véhicules sur la consommation énergétique	44
B. Transport de marchandises	50
1. Généralités	50
2. Facteurs importants	54
3. Consommation énergétique	59
C. Nouveaux moyens de transport	71
1. Généralités	71
2. Transport urbain	72
3. Transport interurbain	76
D. Comparaison des diverses sources d'énergie	91
Annexe I : Commentaires relatifs à l'étude sur modèle	94
Annexe II : Composition du parc de camions	103
Annexe III : Facteurs de conversion	109
Annexe IV : Liste des tableaux	110
Annexe V : Liste des diagrammes	112
Annexe VI : Références	117

Résumé

Ce rapport donne un aperçu de l'énergie consommée par divers moyens de transport tels qu'ils sont actuellement utilisés pour le transport des personnes et des marchandises. Il aborde également de manière succincte la consommation d'énergie de quelques systèmes de transport nouveaux et futurs.

Il passe, finalement, en revue les caractéristiques des diverses sources d'énergie qui sont ou seront utilisées par les moyens de transport.

Dans le secteur du transport des personnes, une distinction est faite entre le transport urbain et le transport interurbain. Dans le domaine du transport urbain de personnes, on comparera entre eux la marche, la bicyclette, le cyclomoteur, la voiture, l'autobus et les moyens de déplacement par rail. Au regard de ces diverses options, la bicyclette est le plus faible consommateur d'énergie, l'auto se révélant, elle, le consommateur le plus important. Nous examinerons par ailleurs divers paramètres qui influencent la consommation d'énergie par voyageurs/kilomètres, tels que le taux d'occupation, les phénomènes de congestion et la vitesse. Dans le secteur du transport interurbain de personnes, une comparaison sera faite entre l'automobile, l'autobus, le train et l'avion ; l'autobus étant le consommateur d'énergie le plus faible et l'avion le plus important. Plusieurs paramètres correspondants seront également examinés.

Dans le secteur du transport des marchandises, aucune distinction n'est établie d'après le caractère urbain ou interurbain du transport. La confrontation concerne en l'occurrence le transport par voie d'eau, par pipeline à longue distance par rail, par route et par air. Le transport par voie d'eau et par pipe-line consomme peu d'énergie tandis que le transport aérien est un gros consommateur. En ce qui concerne le transport par route, nous examinerons en outre l'effet du poids, de la vitesse et du taux de chargement. Actuellement il existe très peu d'éléments d'information sur la consommation en énergie des nouveaux moyens de transport. Dans les données des différents projets, la composante énergétique ne se retrouve ici que sous la forme d'une des composantes des frais d'exploitation, ou en tant que conséquence de la puissance à prévoir pour le mécanisme de propulsion.

En ce qui concerne les nouveaux moyens de transport urbain, les prévisions relatives à la consommation énergétique sont relativement optimistes, surtout si on les met en regard de la consommation énergétique des dispositifs urbains actuels.

Cet optimisme se fonde principalement sur le taux d'occupation nettement plus élevé ainsi que sur la souplesse accrue que l'on attend de ces systèmes.

Les prévisions relatives à la consommation d'énergie des nouveaux moyens de transport interurbain sont beaucoup moins encourageantes. La quasi totalité des projets est axée sur des vitesses de déplacement très élevées et recourt à des systèmes sustentateurs et/ou guidés complets. Or, ces facteurs exercent précisément une influence considérable sur la consommation d'énergie dont la valeur sera généralement un multiple de celle des systèmes interurbains actuels.

Un tableau comparatif fait état de diverses caractéristiques des sources d'énergie actuelles et futures.

La valeur calorifique des carburants respectifs, ainsi que la densité spécifique et le rendement total en fonction du type de moteur ont été indiqués. Certaines caractéristiques, telles que le taux d'émission, la sécurité, le prix de revient, les frais de stockage et de distribution, ainsi que les investissements nécessaires par moteur et par système de carburation, ont été comparées sur la base du moteur à essence classique.

Nous avons mentionné en outre la disponibilité en matières premières.

Conclusions

Introduction

1. La plupart des données relatives à la consommation d'énergie dans le secteur des transports proviennent des Etats-Unis. Ce fait est dû, notamment :

- à la précocité plus marquée de la "crise énergétique" dans ces régions ;
- à l'atmosphère de crise qui s'est développée aux Etats-Unis, principalement en raison d'une dépendance croissante à l'égard des pétroles d'importation. Par ailleurs, comme la moitié de la consommation d'hydrocarbures des Etats-Unis correspond au secteur des transports, il n'est pas étonnant que cette branche d'industrie soit fortement intéressée par des économies éventuelles. De son côté, l'Europe dépend depuis longtemps des pétroles d'importation et le secteur des transports ne consomme que le quart de ce pétrole.
- dans l'ensemble, les moyens de transport américains consomment sensiblement plus d'énergie que leurs homologues européens.

2. En Europe, le secteur des transports intervient dans la consommation énergétique totale pour une part qui ne dépasse pas 10 à 15 %, tandis que l'on atteint largement les 20 % aux Etats-Unis.

La consommation des voitures privées représente, dans la plupart des pays industrialisés, 60 à 70 % de l'énergie totale consommée par le secteur des transports. Aussi bien en Europe qu'aux Etats-Unis, plus de la moitié de la consommation énergétique est urbaine (diagramme 1).

3. Aux Etats-Unis et en Europe, le secteur des transports dépend à raison de 95 % des produits pétroliers en tant qu'énergie propulsive.

Sur l'ensemble du pétrole brut consommé en Europe, le secteur des transports absorbe 28 % (Etats-Unis 53 %) et les voitures particulières 13 % (Etats-Unis 29 %).

4. Les statistiques antérieures à la crise pétrolière montrent que l'énergie n'intervient encore que pour une faible part dans l'ensemble des frais d'exploitation des moyens de transport.

C'est ainsi que, dans le domaine du transport des personnes, cette part est de 5 à 10 % et, dans le domaine du transport des marchandises, les chiffres oscillent de 6 % (transport urbain) à 15 à 20 % (transports internationaux).

Transport de personnes en général (pages 21 à 24 inclusivement).

5. La part de l'automobile dans l'ensemble des courants de trafic (en voyageurs/kilomètres) est de 90 % aux Etats-Unis et de 70 % en Europe (tableau 1).

En Europe occidentale, 39 % des courants de trafic s'effectuent dans les agglomérations urbaines ; ce pourcentage n'est que de 24 % aux Etats-Unis.

6. Bien que, dans les deux régions considérées l'automobile intervienne pour environ 22 % dans l'ensemble des courants de trafic urbains, l'Europe fait un usage nettement plus intensif de l'autobus, du tramway ou du métropolitain. En ce qui concerne le trafic interurbain, l'Europe recourt bien davantage au train, tandis que la préférence des Etats-Unis va nettement à l'avion (tableau 1).

7. Au lendemain de la crise pétrolière, les prévisions relatives à l'évolution future du transport de personnes revêtent un caractère nettement spéculatif et s'appuient généralement sur des extrapolations de tendances (tableau 2). Tant en Europe qu'aux Etats-Unis, la croissance annuelle d'ici 1990 est estimée à plus de 3 %.

En Europe, la part de l'auto se maintient de manière assez constante à 80 % environ du total des courants de trafic. La part prise par l'avion augmente (de 1 % en 1970 à 6 % en 1990), au détriment du train et de l'autobus (tous deux rétrogradent de 9 à 7 %).

8. Sur l'ensemble de l'énergie consommée dans le secteur des transports, 70 à 80 % concernent le transport des personnes et 60 à 70 % les voitures particulières (tant en Europe qu'aux Etats-Unis).

Il semble que la consommation énergétique (voir le diagramme 2) par véhicules/kilomètres ait peu évolué, de 1950 à 1970, en ce qui concerne l'automobile, l'autobus, le tramway ou le métropolitain. On a noté, par contre, des fluctuations importantes en ce qui concerne l'avion (consommation énergétique nettement accrue) et le train (consommation énergétique en baisse).

Transport urbain de personnes, consommation énergétique (pages 25 à 36 inclusivement).

9. Bien que la plupart des données statistiques relatives à la consommation énergétique des moyens de transport destinés aux personnes soient d'origine américaine, il est néanmoins possible de confronter certaines études européennes aux résultats américains. Il est toutefois regrettable que la plupart des études n'indiquent pas les données exactes de base qui ont conduit aux résultats avancés (taux d'occupation, vitesse moyenne, etc.).

Après correction, on aboutit à l'indice suivant (tableau 3) en posant 100 comme indice de référence pour la consommation d'énergie de l'autobus.

Indice de consommation énergétique : cyclomoteur 75, voiture (Etats-Unis) 400, voiture (Europe) 300, autobus 100 et métropolitain/tramway 150 par voyageurs kilomètres.

10. L'influence du taux d'occupation sur la consommation énergétique par voyageurs kilomètres est importante (diagrammes 3 à 6 inclusivement), mais, en raison des différences dans le poids des véhicules et le genre de conduite, cette consommation énergétique est sujette à des fluctuations relativement importantes, même lorsque le taux d'occupation est identique.

Des phénomènes de congestion (diagramme 7) résultent de l'infrastructure urbaine, de l'offre de transport, du genre de conduite, et leur influence sur la consommation d'énergie est grande. Les Etats-Unis tablent sur une vitesse moyenne urbaine sensiblement plus élevée qu'en Europe (32km/h contre 18,5 km/h). Par contre, pour un même véhicule, la consommation moyenne d'énergie en ville est de 40 % supérieure en Europe.

11. C'est principalement en trafic urbain que le poids du véhicule influe sur la consommation énergétique (diagrammes 7, 8 et 9). A cet égard, un doublement du poids du véhicule peut se traduire par une consommation énergétique de 90 % supérieure.
12. La consommation énergétique des autobus (diagrammes 10 et 11) est principalement fonction du poids brut par passager et de la distance entre les arrêts.

Le recours à des voies de circulation dégagées pour autobus a pour effet d'élever la vitesse moyenne, mais n'exerce aucune influence sur la consommation énergétique. Ceci provient du fait que l'augmentation de consommation consécutive à une vitesse de circulation supérieure compense la diminution de consommation résultant de la fréquence moindre des arrêts.

Transport de personnes interurbain, consommation d'énergie (pages 37 à 43 inclusivement).

13. Ces résultats reposent également sur quelques études américaines qui ont été contrôlées et corrigées à la lumière des rares données européennes disponibles. La dispersion des résultats est toutefois nettement moins accusée que dans le cas du transport urbain, du fait du mode de conduite plus fluide.

Indice de consommation énergétique (tableau 5) ; autobus 100, train 150, automobile 300, avion 600 par voyageur/kilomètre.

14. Les études européennes et américaines diffèrent peu quant à leurs résultats, probablement en raison du fait que divers facteurs déterminants se neutralisent mutuellement (poids, mode de conduite, nombre de places assises).
15. Le taux d'occupation (diagrammes 12 à 16 inclusivement) exerce une grande influence sur la consommation énergétique. La dispersion à l'intérieur de chaque catégorie de moyen de transport est toutefois inférieure à ce que l'on observe en matière de trafic urbain, par suite de l'allure plus régulière du profil de vitesse (cf aussi le diagramme 7).

16. Lorsque les voitures circulent à une vitesse constante ou qui varie peu (plus ou moins de 20 %), une variation de la vitesse moyenne n'exerce qu'une faible influence sur la consommation d'énergie (diagramme 7).

Par contre, lorsque la vitesse varie dans de fortes proportions (mode de conduite irrégulier) ou lorsque l'on a à faire avec des voitures beaucoup plus lourdes, l'influence de la vitesse moyenne est plus sensible.

Impact des caractéristiques techniques des véhicules sur la consommation énergétique (pp. 44 à 49 inclusivement, annexe I)

17. Outre le poids du véhicule, son taux d'occupation ou de chargement ainsi que le mode de conduite (indiqué grâce à la vitesse moyenne), il existe encore des aspects techniques spécifiques susceptibles d'influencer la consommation énergétique d'un véhicule routier :

- l'influence de la charge est faible dans le cas du transport de personnes (diagramme 17) ;
- l'influence de la résistance au roulement (qui est fonction de la vitesse, du poids et des pneus) est faible (diagramme 33) ;
- l'influence de la résistance aérodynamique (carénage aérodynamique) est négligeable en trafic urbain, mais elle peut croître jusqu'à 10 % en cas de transport de personnes sur route libre (diagramme 34).

Dans l'hypothèse de camions nettement plus volumineux, un carénage plus aérodynamique peut se traduire par une amélioration de 30 à 40 % de la consommation énergétique sur route libre.

- l'influence de la résistance d'accélération n'est à prendre en considération qu'en cas de trafic urbain, lorsque des accélérations multiples entraînent une élévation de la vitesse de circulation moyenne et, dès lors, une consommation énergétique accrue (cf diagramme 7).

Ce facteur est principalement à considérer dans le cas des autobus, dont les arrêts sont nombreux (cf diagramme 10).

- les exigences sévères en ce qui concerne les émissions aux Etats-Unis exercent une influence relativement importante sur la consommation énergétique en ville (cf diagramme 18).

En trafic interurbain, cette influence est réduite à 3 %. Les exigences européennes en matière d'émissions, notablement plus tolérantes, ne se répercutent nullement sur la consommation énergétique.

- des accessoires tels que la direction assistée (servo-direction) et surtout le conditionnement d'air peuvent faire croître la consommation énergétique jusqu'à 20 %, principalement aux basses vitesses (cf diagramme 19).
- en service urbain, la transmission automatique provoque une surconsommation de 10 à 15 %. Hors ville, cette augmentation se ramène à 2 - 10 %.
- la cylindrée exerce surtout une influence sur la consommation énergétique en circulation urbaine (diagramme 35). Sur route libre, un moteur de 1500 cc consomme 10 % de plus qu'un moteur de 1000 cc ; en ville, l'écart entre les deux cylindrées est de 15 à 20 %.

18. D'autres dispositifs de propulsion pour véhicules routiers que le moteur à essence ont une grande influence sur la consommation énergétique (diagramme 20).

Par rapport à une voiture américaine de 1973, les moteurs diesel consomment de 35 à 60 % de moins. Par contre, les moteurs à piston rotatif du type Wankel consomment 50 % de plus, tandis que le moteur à charge stratifiée consomme en moyenne autant que le moteur à essence.

La consommation énergétique des systèmes futurs de propulsion, tels les moteurs à combustion externe (Stirling, Rankine, Brayton) est de 10 à 20 % inférieure à celle du moteur à essence comparable.

Le transport des marchandises, en général (pp. 50 à 58 inclusivement)

19. En tonnes kilométriques parcourues, le transport total de marchandises est, aux Etats-Unis 3,5 fois supérieur à celui de l'Europe (tableau 6).

Les prévisions sur la base des extrapolations de tendances indiquent d'ici 1990 une croissance qui suit approximativement l'évolution du produit national brut.

20. La part prise en Europe par le transport routier (tableau 6) est, en 1970, de 48 % (Etats-Unis 21 %), celle du train de 32 % (Etats-Unis 39 %), celle du transport par voie d'eau de 13 % (Etats-Unis 16 %) et celle de l'acheminement par oléoduc ou gazoduc de 7 % (Etats-Unis 23 %).

Il existe toutefois en Europe des écarts sensibles par rapport à cette répartition moyenne (tableau 7). Les prévisions indiquent que la part assumée par le transport routier continue à croître dans tous les pays.

21. Dans le secteur du transport de marchandises, les principaux facteurs déterminants sont les suivants : le type de marchandises à transporter, la distance à parcourir ainsi que la capacité de charge disponible. Chacun de ces facteurs a une influence nette sur l'économie d'entreprise, tandis que la consommation énergétique dépend principalement de la vitesse de circulation et du taux de chargement.
22. L'influence des diverses catégories de biens à transporter sur la consommation énergétique dépend essentiellement de la combinaison poids/volume par unité transportée. C'est ainsi que le même moyen de transport sera chargé bien plus lourdement dans le cas de transport de marchandises en vrac de haute densité que dans celui de marchandises à la pièce.
23. Le transport de marchandises en vrac peut s'effectuer moyennant une faible consommation énergétique si la capacité de charge disponible et la distance de transport sont importantes.

C'est la raison pour laquelle de nombreuses marchandises en vrac sont transportées par pipe-lines à longue distance, voie d'eau ou rail, tandis qu'une part croissante du trafic est assumée par des véhicules routiers de plus en plus lourds.

24. La distance de transport constitue un facteur d'appréciation en raison de la situation concurrentielle des moyens de transport respectifs ; la part assumée par le transport routier augmente dans la mesure où la distance à franchir diminue. Les distances importantes de transport influent favorablement sur la consommation énergétique, car elles permettent de maintenir longtemps une vitesse optimale.

Transport de marchandises, consommation énergétique (pp. 59 à 70 inclusivement, annexe II).

25. La consommation énergétique du transport des marchandises représente 20 à 30 % de la consommation énergétique totale du secteur des transports (diagramme 1).

Les modifications historiques qui ont eu lieu de 1950 à 1970 sur le plan de la consommation énergétique (diagramme 21) ne sont importantes que dans le secteur de l'aviation (forte augmentation) et du chemin de fer (forte diminution).

26. Le transport urbain de marchandises s'effectue presque exclusivement à l'aide de camionnettes de livraison qui, sur le plan de la consommation d'énergie, sont comparables aux voitures particulières d'assez grosse cylindrée. En dessous de 20 km/h (vitesse courante en trafic urbain), l'influence de la vitesse de circulation moyenne sur la consommation énergétique est considérable (diagramme 23). Le montage de moteurs diesel dans ces camionnettes de livraison peut se traduire par un gain énergétique de 10 à 20 %.

27. Nous disposons de peu de données statistiques concernant la consommation énergétique dans le domaine du transport interurbain de marchandises ; par ailleurs, nous manquons de chiffres précis en ce qui concerne le taux de chargement, la vitesse moyenne et autres données analogues (tableau 10).

Les études disponibles permettent de déduire l'indice de consommation énergétique suivant (par tonne de fret/kilomètre) : eau 75, pipe-line 60, chemin de fer 100, route (interurbaine) 300, avion 4000.

28. Les rares études européennes existantes confirment l'indice ci-dessus, bien que les données relatives au trafic ferroviaire soient très largement conditionnées par le nombre de véhicules utilisés.

Pour un coefficient de remplissage déterminé, une concentration quintuple de voitures peut se traduire, par exemple, par une consommation d'énergie approximativement quatre fois plus favorable. Les données européennes relatives au transport de marchandises par pipe-line à longue distance et par bateau sont généralement des estimations.

29. Dans le domaine du transport de fret interurbain, la véritable concurrence se joue surtout entre le transport ferroviaire et les camions lourds (d'une capacité de charge utile supérieure à 10 tonnes).

Au delà de 12 tonnes, l'influence du poids total sur la consommation énergétique est négligeable (diagramme 22).

30. Dans une large fourchette de vitesses, l'influence de la vitesse de circulation moyenne sur la consommation énergétique des camions lourds est faible, de même que dans le cas des gros autobus (cf diagrammes 10 et 25).

31. La consommation d'énergie par tonne kilométrique est fortement influencée par la capacité de charge disponible pour un poids total ou brut déterminé. Lorsque le poids brut diminue (diagramme 26), la consommation énergétique augmente sensiblement, surtout dans le cas des camions de plus faible tonnage (de moins de 10 à 15 tonnes de poids brut).

On note le même profil de surconsommation fortement croissante lorsque le taux de chargement descend en-dessous de 40 à 50 % (diagramme 27).

32. Du point de vue de la consommation énergétique, la tendance actuelle à l'utilisation de camions sans cesse plus volumineux semble favorable, car ceux-ci peuvent transporter des charges plus importantes, ce qui a pour effet de réduire la relation poids total/charge utile (diagramme 28).
33. Dans le cas des camions, la tendance actuelle à recourir à des puissances installées sans cesse accrues a un effet néfaste sur la consommation énergétique notamment par suite de l'augmentation de la vitesse moyenne. Une consommation d'énergie moindre (de 20 à 30 %) peut être la conséquence d'une carrosserie plus légère (augmentation de la charge utile) et d'un carénage plus aérodynamique (moindre résistance à l'air).
34. La limitation du poids total (généralement jusqu'à 40 tonnes) en vigueur dans plusieurs pays est nuisible du point de vue de la consommation énergétique, étant donné que des unités plus importantes (cf train, conclusions 28) ont une consommation énergétique plus favorable et que les camions lourds sont capables, en principe, de transporter un tonnage supérieur.

C. Nouveaux moyens de transport. Généralités (pp. 71 à 74 inclusivement)

35. On accorde actuellement beaucoup d'attention au développement des nouveaux moyens de transport, qu'il s'agisse du transport urbain que du transport interurbain (personnes). En raison des problèmes de congestion liés aux moyens actuels de transport, c'est surtout pour réduire la durée des déplacements que l'on s'intéresse à ces systèmes.
36. Dans le développement des nouveaux moyens de transport, ce sont les aspects technico-économiques qui priment. Les aspects planologiques et d'environnement bénéficient par ailleurs d'une attention accrue. Jusqu'à présent, l'aspect énergétique n'a guère été étudié, sauf en tant que facteur de coût.

37. En ce qui concerne le transport urbain, on songe principalement à des systèmes non guidés (par exemple des automobiles urbaines électriques) et à des systèmes guidés de petite capacité (Personal Rapid Transport, PRT). En ce qui concerne les systèmes interurbains, on développe de préférence des systèmes guidés, sous la forme de trains rapides (vitesses pouvant atteindre 300 km/h) et des systèmes ultrarapides à coussin d'air ou à coussin magnétique (vitesses pouvant atteindre 500 km/h). La quasi-totalité de ces systèmes en sont encore au stade expérimental.

Nouveaux systèmes de transport, aspects énergétiques (pp. 74 à 90 inclusivement).

38. La consommation énergétique des nouveaux systèmes de transport urbains, tels que le PRT, le minitram et le miniméto, est comparable à celle des systèmes actuels, pour un taux d'occupation identique (diagramme 29).
39. Le développement des nouveaux systèmes de transport interurbains vise essentiellement à augmenter dans des proportions considérables les vitesses de déplacement (de 250 à 500 km/h), ce qui rend indispensable le recours à de très grandes puissances de propulsion destinées à vaincre la résistance de l'air. Cet aspect est très défavorable du point de vue énergétique (tableaux 11 et 12).
40. Les nombreux systèmes de traction en cours de développement ont un rendement énergétique théorique qui se rapproche de celui des trains actuels ou qui le dépassent même légèrement (tableau 13).

Le recours à de volumineux moteurs diesel pour la propulsion a tout particulièrement un effet favorable à cet égard, contrairement à l'utilisation des turbines à gaz ou à de nouveaux moteurs électriques (tableau 12).

41. Les dispositifs aéronautiques en cours de développement (STOL, VTOL, SST) se révèlent théoriquement encore plus défavorables que les grands avions actuels (tableau 12 et diagramme 32) du point de vue énergétique.

42. Les systèmes bi-mode, tels que l'autoroute automatique et l'autotrain présentent, en théorie, des aspects très favorables du point de vue énergétique (tableau 12).
43. Actuellement, on accorde la plus grande attention au développement de coussins d'air et de coussins magnétiques destinés à des vitesses pouvant atteindre 500 km/h. Il en existe de plusieurs sortes qui peuvent se différencier selon les systèmes de sustentation (coussins d'air, dispositif électromagnétique, électrodynamique) et la technique de propulsion (turbopropulseurs, différentes catégories de moteurs électriques). Les rendements énergétiques théoriques de tous ces systèmes se situent dans l'ordre de grandeur propre aux avions actuels (tableau 12).
44. On peut déduire des très rares données énergétiques dont on dispose au sujet des coussins magnétiques et des systèmes à coussin d'air qu'il faudra installer des puissances considérables si l'on désire atteindre les hautes vitesses envisagées. Il semble bien que, par tonne de poids brut, les puissances installées seront de 5 à 10 fois supérieures à celles des trains rapides qui demeurent encore compétitifs actuellement (tableau 14).
45. Seuls les systèmes à coussin électromagnétique semblent présenter une consommation énergétique relativement moindre, en raison, notamment, des forces sustentatrices moins élevées requises aux grandes vitesses.
- D. Comparaison des sources énergétiques (pp. 91 à 93 inclusivement)
46. Outre les combustibles existants (essence, diesel-oil et LPG), on étudie, par souci de l'environnement, les perspectives offertes par le gaz naturel (dans les autobus urbains) et par le méthanol (à mélanger à l'essence). A long terme, ce sont les sources d'énergie non tributaires des combustibles fossiles et qui présentent dès lors d'éventuels avantages du point de vue du milieu qui offriront le plus d'intérêt. C'est le cas particulièrement de l'hydrogène et de l'électricité.

Introduction

Le présent rapport a été établi à la demande de la Direction générale des Transports de la Commission des Communautés européennes, à Bruxelles.

Son objectif est de donner un aperçu de la consommation énergétique des moyens actuels de transport et de les regrouper de telle manière qu'ils puissent faire l'objet d'une comparaison réciproque.

Par ailleurs, nous présentons un aperçu du rendement énergétique (qui est la réciproque de la consommation énergétique) des moyens de transport actuellement en cours de développement et nous comparons entre elles les sources d'énergie les plus importantes.

Récemment encore, la consommation énergétique d'un système de transport ne constituait guère davantage qu'un facteur relativement mineur dans le prix de revient d'une exploitation.

A présent que les produits pétroliers renchérissent, on commence toutefois à s'intéresser très vivement à la composante énergétique des moyens de transport, étant donné que le secteur des transports dépend, à concurrence de 95 %, des produits pétroliers en tant que combustibles. Pour l'instant, la part de l'énergie dans l'ensemble des coûts d'exploitation du transport de voyageurs ne semble pas encore dépasser les 5 à 10 %. A cet égard, un parallèle avec le budget industriel moyen semble donc s'imposer, étant donné que, dans ce secteur également, la contribution de l'énergie ne semble pas excéder de beaucoup les 4 à 5%. Par contre, dans le secteur du transport de marchandises, le coût de l'énergie est sensiblement supérieur : il oscille entre 6 % pour le transport local et 20 % dans le domaine du transport international. (Réf.: 28).

Ce rapport a été établi sur la base de données bibliographiques complétées par des relevés et des calculs effectués par TNO. Toutefois, étant donné que les Etats-Unis ont commencé à s'intéresser avant l'Europe au problème énergétique, la plupart des données relatives à la question ont été empruntées à la littérature américaine.

.../...

C'est pourquoi, chaque fois que cela sera possible, nous examinerons dans quelle mesure ces chiffres s'appliquent à l'Europe. Cette confrontation est d'autant plus importante que, à maints égards, des écarts sensibles peuvent se manifester entre l'Europe et les Etats-Unis et que l'on raisonne très souvent sur la base de références américaines.

Parmi les différences les plus frappantes qui se manifestent aux Etats-Unis et en Europe dans le domaine de la consommation énergétique du secteur des transports, il en existe deux qui concernent la part prise par ce secteur dans l'ensemble de la consommation pétrolière. Il apparaît en premier lieu qu'aux Etats-Unis 53 % du pétrole brut est utilisé dans le secteur des transports, tandis que cette part ne représente en moyenne que 28 % dans les pays de la C.E.E. (Réf.: 3). On constate, en deuxième lieu, que la seule consommation du parc automobile américain absorbe 29 % du pétrole brut total, tandis que cette part n'est que de 13 % en Europe occidentale.

Ces chiffres expliquent également pourquoi la consommation d'énergie du secteur des transports en général, et de la voiture en particulier, a reçu aux Etats-Unis une priorité nettement plus marquée qu'en Europe occidentale. En dépit de cette consommation énergétique sensiblement supérieure de l'ensemble du secteur des transports, la répartition de cette consommation entre les différentes catégories de moyens de transport ne semble pas accuser d'écarts très marqués.

Le diagramme 1 ci-joint illustre la répartition respective par secteurs aux Etats-Unis vers 1966, mais, s'il faut en croire les rapports de l'OCDE, les résultats européens n'en sont pas très éloignés. La contribution de l'automobile dans la consommation énergétique de l'ensemble du secteur américain des transports était, en 1969, de 70,7 % (soit un score légèrement inférieur à celui de 1966) ; les chiffres européens correspondants pour 1970 sont les suivants : 70,6 % en France, 69,1 % en République féd. d'Allemagne, 65,3 % en Italie et 63,4 % au Royaume-Uni. Le tableau ci-joint reflète donc dans une certaine mesure la situation telle qu'elle se présente en Europe occidentale, bien que la ventilation détaillée accuse quelques divergences (nous y reviendrons dans les chapitres ultérieurs).

Le propos du présent rapport n'est toutefois pas de fournir des données en ce qui concerne la consommation énergétique du secteur des transports en général, mais de permettre l'établissement de comparaisons relatives à la consommation énergétique de différents systèmes de transport. Nous avons rassemblé à cet effet des données concernant ce qu'il est convenu d'appeler la consommation énergétique (c'est-à-dire l'unité d'énergie par voyageur/kilomètre ou par tonne/km) ou, inversement, concernant le rendement énergétique (voyageur/kilomètre ou tonne/kilomètre par unité d'énergie). Nous nous sommes référés dans toute la mesure du possible, dans ce rapport, à la kilocalorie en tant qu'unité énergétique, puisqu'il s'agit là de l'unité la plus couramment utilisée en Europe.

La plupart des études américaines font usage de l'unité énergétique BTU (British Thermal Unit), tandis que certaines études européennes se réfèrent aussi au Joule et au Kilowatt/heure. Un tableau de conversion figure à l'annexe III.

Ce rapport ne fait pas mention de l'économie d'énergie qu'il est possible de réaliser par le biais d'une action directe ou indirecte sur le trafic. On pourra se faire une idée des possibilités qui existent à ce sujet dans le chapitre 6 du rapport "Economie d'Energie" (Energiebesparing) qui sera publié sous peu par la "Fondation néerlandaise pour l'étude des aspects futurs de la technique" (Nederlandse Stichting Toekomstbeeld der Techniek), La Haye, 1974.

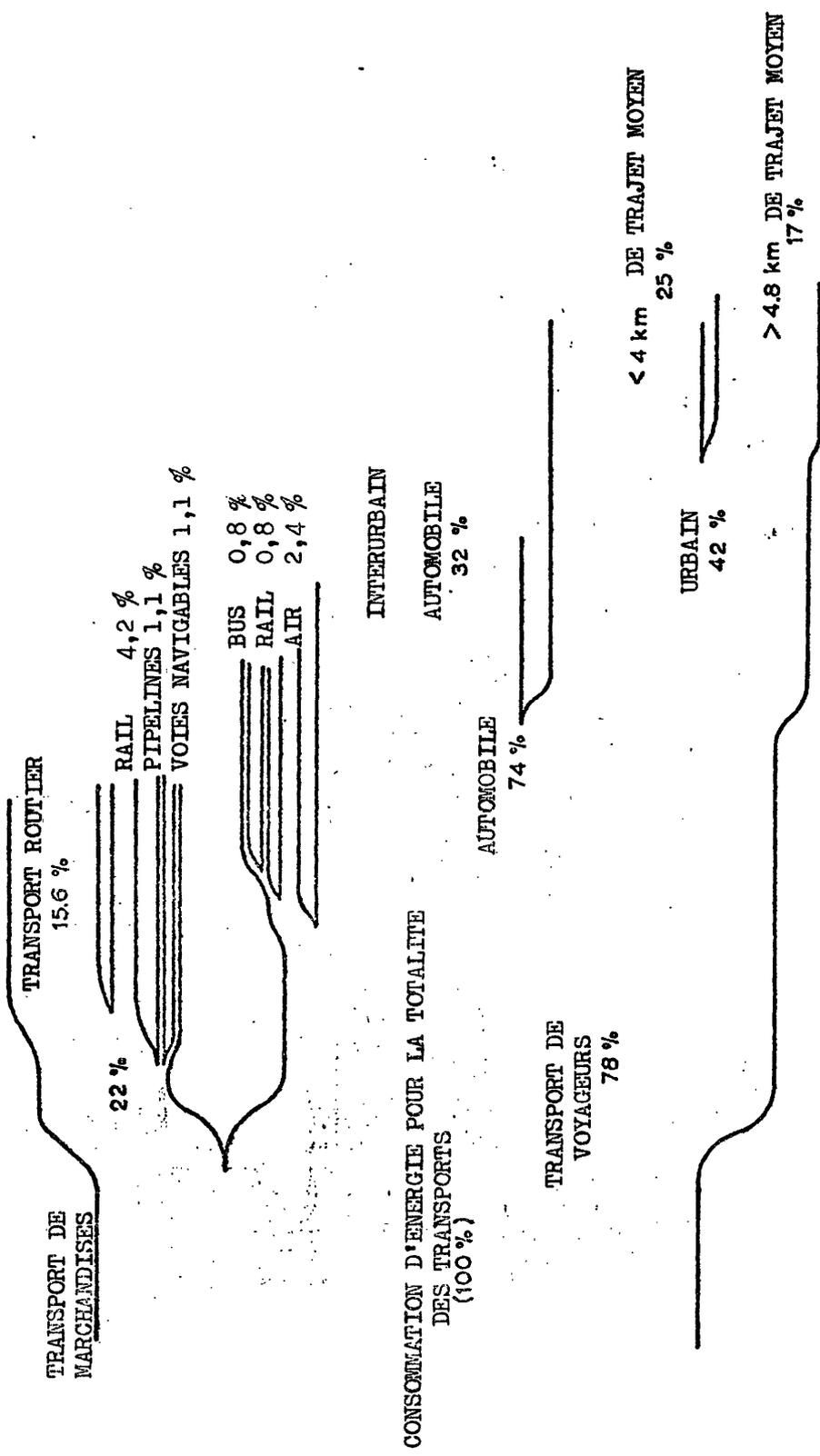


DIAGRAMME 1 REPARTITION DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE TOTALE DANS LE SECTEUR AMERICAIN DES TRANSPORTS (1965-1966)

REFERENCE 4

A. Le transport des voyageurs

1. Généralités

Le tableau 1 donne un aperçu du nombre total de voyageurs/kilomètres correspondant à chacun des divers moyens de transport.

La part des automobiles est pratiquement de 90 % aux Etats-Unis (1968), tandis qu'elle avoisinait les 70 % en Europe occidentale au cours de la même année.

Ce tableau illustre également quelques différences significatives entre ces deux régions. On constate tout d'abord qu'en Europe occidentale une part relativement importante des courants de trafic s'effectue dans les villes (38,5 % contre 24 % aux Etats-Unis). Par ailleurs, la bicyclette occupe une place plus importante en Europe dans le trafic urbain. Dans le cas du trafic interurbain, l'Europe utilise davantage le train et l'autobus ou l'autocar que les Etats-Unis. Dans la période actuelle de changement des mentalités, les prévisions relatives au développement futur du transport de personnes ont un caractère nettement spéculatif. Les prévisions du tableau 2 sont basées sur des extrapolations de tendance, d'où il résulte que, de 1970 à 1990, le taux de croissance est considéré comme identique pour les deux régions de référence, à savoir 3,2 % par an pour l'Europe occidentale et 3,1 % par an pour les Etats-Unis. On s'attend toutefois à un accroissement supérieur de la fréquence des déplacements en Europe occidentale : 2,3 % par an contre 1,7 % aux Etats-Unis. Dans ce dernier pays, on s'attend à une diminution de la participation automobile, principalement au profit de l'avion. En Europe, par contre, la part de l'automobile demeurera relativement stable tandis que la croissance du développement des transports aériens s'effectuera en majeure partie du détriment de l'autocar et du train.

Un tableau rétrospectif américain fait état des modifications relativement importantes qui sont intervenues au cours de la période 1950-1970 en ce qui concerne la consommation énergétique des divers moyens de transport (diagramme 2). Ce diagramme montre, par ailleurs, que cette consommation énergétique s'est actuellement stabilisée dans une certaine mesure, encore que des mesures en matière de sécurité et d'hygiène de l'environnement pourraient bien se traduire par de nouveaux bouleversements dans ce domaine.

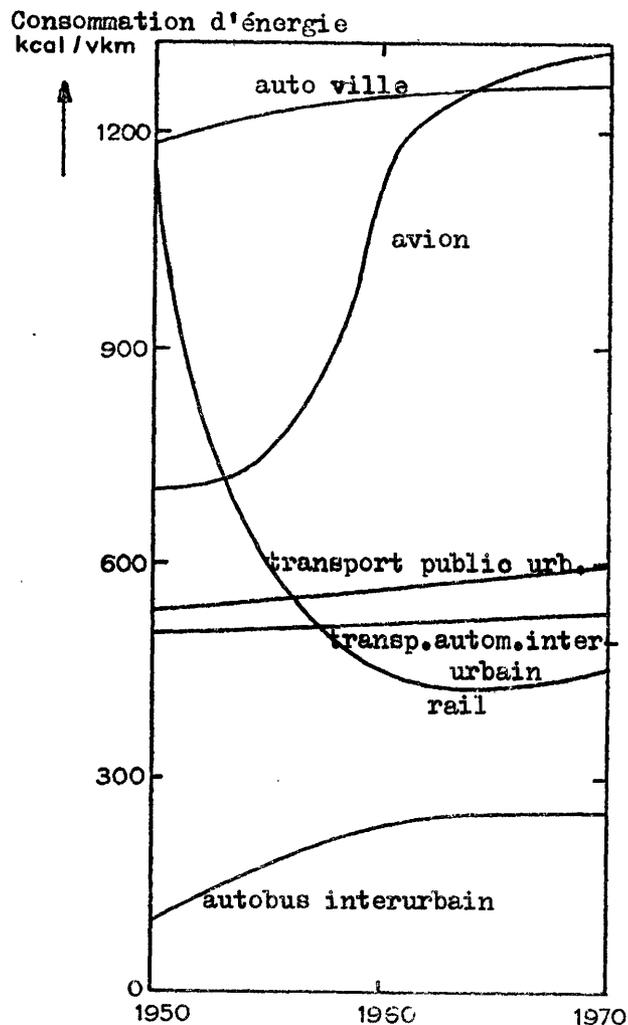


DIAGRAMME 2 VARIATIONS DANS LE TEMPS DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE PROPRE AUX DIVERS MOYENS DE TRANSPORT DE PERSONNES

REFERENCE 5

	Etats-Unis				Europe occidentale, 1968	
	10 ⁹ voyageur/km		en % du total		10 ⁹ voyageur/km	en % du total
	1950	1968	1950	1968		
<u>Transport urbain</u>						
Marche (1)	6	8	0,5	0,5	10	0,5
Automobile	195	560	18,5	22,5	400	21,5
Autobus/trem	16	9	1,5	0,5	180	9,5
Métro/rail	9	3	1,0	-	45	2,5
Bicyclette/cyclomoteur	25	11	2,0	0,5	85	4,5
Total	251	591	23,5	24,0	720	38,5
<u>Transport interurbain</u>						
Automobile (2)	705	1660	66,0	67,0	900	48,0
Avion	16	158	1,5	6,5	25	1,5
Rail	52	20	5,0	1,0	150	8,0
Autobus (2)	42	42	4,0	1,5	65	3,5
Voies navigables	2	6	-	-	10	0,5
Total	817	1884	76,5	76,0	1150	61,5
TOTAL	1068	2475	100,0	100,0	1870	100,0
dont						
Automobile	990	2220	92,5	89,5	1300	69,5
Population (10 ⁶)	152	199			327	
10 ³ km par habitant	7,0	12,4			5,7	

Tableau 1 - Transport de voyageurs; contribution par moyen de transport aux Etats-Unis et en Europe

Références : 1

(1) uniquement les déplacements qui peuvent également être effectués par véhicule mécanisé

(2) y compris, aux Etats-Unis, la contribution des déplacements interurbains à l'intérieur des agglomérations urbaines

	1960					1970					1980					1990					Croissance annuelle	
	1960	1970	1980	1990	1990-70	1970	1980	1990	1990-70	1970	1980	1990	1990-70	1970-60	1970-90	1950-70	1970-90					
<u>Total voyageurs/km continentaux (10¹²)</u>																						
Etats-Unis	1,7	2,5	3,7	4,7	4,2	2,5	3,7	4,7	4,2	2,5	3,7	4,7	4,2	3,2	3,2	4,2	3,2					
Europe	1,0	2,1	3,2	5,6	7,7	2,1	3,2	5,6	7,7	2,1	3,2	5,6	7,7	3,1	3,1	7,7	3,1					
<u>Total, par habitant, des voyageurs continentaux</u>																						
Etats-Unis	9,4	12,0	15,4	16,8	2,6	12,0	15,4	16,8	2,6	12,0	15,4	16,8	2,6	1,7	1,7	2,6	1,7					
Europe	3,2	6,4	8,9	10,0	6,8	6,4	8,9	10,0	6,8	6,4	8,9	10,0	6,8	2,3	2,3	6,8	2,3					
<u>Fraction du nombre total de voyageurs/km</u>																						
Etats-Unis	92	91	86	77	4,3	91	86	77	4,3	91	86	77	4,3	2,4	2,4	4,3	2,4					
Automobile																						
Autobus	3	2	1	1	0,9	2	1	1	0,9	2	1	1	0,9	0,5	0,5	0,9	0,5					
Reil	2	1	1	1	4,8	1	1	1	4,8	1	1	1	4,8	0	0	4,8	0					
Avion	3	6	12	21	12,0	6	12	21	12,0	6	12	21	12,0	9,8	9,8	12,0	9,8					
Europe																						
Automobile	61	81	84	80	12,1	81	84	80	12,1	81	84	80	12,1	2,8	2,8	12,1	2,8					
Autobus	19	9	7	7	2,0	9	7	7	2,0	9	7	7	2,0	1,2	1,2	2,0	1,2					
Reil	19	9	6	7	0,7	9	6	7	0,7	9	6	7	0,7	1,1	1,1	0,7	1,1					
Avion	1	1	3	6	-	1	3	6	-	1	3	6	-	11,0	11,0	-	11,0					

Tableau 2 - Prévisions relatives au transport des personnes aux Etats-Unis et en Europe

Référence : 1

2. Transport urbain de voyageurs

La plupart des études relatives à la consommation énergétique en matière de transport de voyageurs sont d'origine américaine ; si certaines d'entre elles font une distinction entre le transport urbain et le transport interurbain de voyageurs, d'autres sont muettes à ce sujet.

Le tableau 3 regroupe les chiffres de consommation relatifs aux divers moyens de transport. Dans la mesure où ces données étaient en notre possession, nous avons également indiqué l'éventail des différentes vitesses moyennes et le taux d'utilisation. Les chiffres de consommation entre parenthèses n'entrent pas en ligne de compte pour le calcul de la moyenne, les indications relatives à ces données étant trop imprécises. Un certain nombre d'entre elles sont d'ailleurs corrigées, étant donné que de nombreuses études américaines appliquent des valeurs calorifiques excessives aux carburants. La comparabilité de ces chiffres est ainsi améliorée.

Nous avons également, à titre de comparaison, mentionné les chiffres relatifs à la marche et à la pratique de la bicyclette. Le tableau montre qu'il existe une dispersion considérable en ce qui concerne la consommation d'énergie par moyen de transport ; néanmoins, une comparaison entre les divers moyens de transport demeure possible.

Le tableau mentionne une consommation énergétique de 890 kilocalories par voyageur/kilomètre(kcal/vkm) en ce qui concerne l'usage de la voiture ; ce chiffre est inférieur pour l'Europe, puisqu'il se situe à environ 640 kcal/vkm. L'impact des différents modes de conduite (vitesse moyenne inférieure en Europe, vitesse moyenne supérieure aux Etats-Unis) ainsi que l'influence du poids du véhicule (poids moyen inférieur en Europe, poids moyen supérieur aux Etats-Unis) sur la consommation énergétique s'annulent mutuellement dans une certaine mesure. La consommation énergétique moyenne des autobus est d'environ 230 kcal/vkm. Ce chiffre peut être sensiblement moindre pour l'Europe, le nombre de places pouvant bien atteindre en effet la centaine.

Dans le domaine des véhicules à propulsion électrique, la comparaison devient, en règle générale, moins crédible. Dans certains cas, il n'est pas tenu compte du rendement de la centrale électrique, ni des pertes survenant lors de la transmission et de la distribution de l'énergie électrique. Dans d'autres cas, les rendements admis ne sont pas mentionnés. En règle générale, le rendement variera légèrement, compte tenu du type de centrale et de la distance de transmission de l'énergie. Les valeurs de ce rendement global oscillent toutefois entre 16 et 28 %. Lorsqu'on recourt au stockage de l'énergie électrique, dans les batteries d'accumulateurs par exemple, le rendement global fléchit d'environ 10 à 16 %.

Si nous fixons à 100 l'indice de la consommation énergétique d'un autobus par voyageur/kilomètre, nous pouvons aboutir à la comparaison approchée suivante :

cyclomoteur	75
automobile Etats-Unis	400
automobile Europe	300
autobus	100
métro/tram	150

A cet égard, ce sont évidemment les taux d'utilisation mentionnés dans le tableau qui sont applicables. Cette indexation peut raisonnablement s'appliquer tant aux Etats-Unis qu'à l'Europe, même si les valeurs absolues sont légèrement décalées.

Au tableau 4 figure une comparaison plus détaillée entre les moyens de transport public. Ces chiffres de consommation proviennent du Royaume-Uni et ils sont légèrement inférieurs aux chiffres, américains pour la plupart, figurant dans le tableau 3. La consultation des deux tableaux montre toutefois que la consommation énergétique de la traction diesel est sensiblement inférieure à celle de la traction électrique, et ce tant en ce qui concerne le transport routier que le transport par rail.

.../...

Le diagramme 3 reproduit la relation existante, pour quelques types de moyens de transport, entre le taux d'utilisation et la consommation énergétique par voyageur/km. Nous n'avons pas tenu compte de l'influence de la charge sur la consommation de carburant, du fait que cette dernière est négligeable, compte tenu de la très grande dispersion par type de véhicule. Cette dispersion par type de véhicule est représentée graphiquement dans les diagrammes 4, 5 et 6, également en relation avec le taux d'utilisation. La consommation énergétique correspondant à un taux d'utilisation de 100 % peut, pour les divers moyens de transport, s'élever jusqu'au triple de la consommation minimale indiquée par voyageur/kilomètre, cette différence résultant principalement de variations dans le poids du véhicule et le mode de conduite.

Les différences dans le mode de conduite dans le transport urbain sont essentiellement déterminées par l'infrastructure, l'offre de transport, les phénomènes de congestion de trafic et, dans une mesure moindre, par le comportement du conducteur lui-même.

Les phénomènes de congestion enregistrés dans le trafic urbain exercent un effet indéniable sur la vitesse moyenne des véhicules.

Dans la mesure où les phénomènes de congestion en question s'intensifient, la vitesse moyenne de conduite des véhicules diminue. Le diagramme 7 reproduit cette relation pour quelques catégories de voitures particulières, classées selon leur poids. Nous avons adopté ce qu'il est convenu d'appeler le "cycle européen" en tant que mode de conduite moyen en circulation urbaine européenne ; sa vitesse moyenne est de 18,5 km/h, tandis que la vitesse du cycle américain est d'environ 32 km/h. (CVS cycle). Le diagramme 7 illustre clairement l'importance des écarts de consommation énergétique correspondant à ces vitesses, les écarts en question pouvant atteindre environ 40 %. Ce diagramme met également en évidence l'influence marquée du poids des véhicules sur la consommation énergétique en circulation urbaine. Un doublement du poids du véhicule se traduit par une augmentation de l'ordre de 90 % en ce qui concerne la consommation énergétique.

Comme l'indique le diagramme 8, l'influence du poids des voitures sur la consommation énergétique est moindre en trafic interurbain. Le diagramme 9 montre nettement les différences de consommation énergétique qui caractérisent les modes européen et américain de conduite urbaine, en relation avec le poids des véhicules.

La consommation énergétique des autobus est principalement due à l'annihilation et la reconstitution de l'énergie cinétique lors de chaque arrêt. Les facteurs principaux sont, dès lors, le poids brut par passager transporté, ainsi que l'espacement des arrêts. Le poids brut par passager peut, en particulier, différer considérablement selon les cas. En comparaison, l'influence de la vitesse moyenne de circulation paraît faible. Dans le diagramme 10, la consommation a été calculée à diverses vitesses, pour un autobus d'un poids net d'environ 9 tonnes et d'une capacité de 100 passagers. On a choisi une distance de 500 m en tant que longueur séparant les divers arrêts. Lorsque l'espacement est supérieur à 500 m, la consommation diminue, ainsi qu'il ressort d'une comparaison avec l'autobus interurbain, à propos duquel on a, en zone urbaine, adopté une distance de 1000 m entre les arrêts.

En pratique, la vitesse moyenne sera de 15 à 20 km/h. L'utilisation de bandes réservées aux autobus augmente cette vitesse dans se répercuter autrement sur la consommation d'énergie. Le diagramme 11 reproduit l'influence du taux d'utilisation. C'est surtout lorsque le taux d'utilisation est faible que la consommation par voyageur/km augmente fortement, en raison du rapport défavorable poids brut/passagers. Comme le poids net de l'autobus n'est que faiblement influencé par la capacité, ce diagramme donne également une indication sur l'influence de cette capacité, telle qu'elle est mentionnée également sur la diagramme 5.

Le paragraphe 4 traite encore de quelques paramètres techniques du véhicule, dont l'influence se manifeste sur la consommation énergétique tant en circulation urbaine qu'en circulation interurbaine.



Moyen de transport	consommation d'énergie *								limites de consomm.	consommation moyenne	limites des vit. moyennes	taux d'utilisation
	62	47										
Marche	62	47						55	47 - 62	55	4 - 6,5	100
Bicyclette	(14)	28					20	20 - 28	20	25	8 - 15	100
Cyclomoteur	170		(130)				170	170	170	170	30 - 40	100
Etats-Unis	680	1140		1010			725	680 - 1140	680 - 1140	890	30	20 - 40
Automobile												
Europe					630			645	630 - 645	640	20	30 - 35
Autobus	180	(520)	(90)	180			305	180 - 305	180 - 305	230	25 - 40	20 - 30
Métropolit.				280			290					
Trolleybus							490	155 - 580	155 - 580	325	20 - 30	20 - 30
Trein							155					
Référence	20	6	5	14	8	9	10	11	15	d'après les références citées		

Les valeurs entre parenthèses n'ont pas été prises en considération pour le calcul de la moyenne

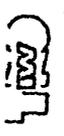
* consommation directe de carburant, ou consommation de carburant pour la production d'énergie électrique
 Tableau 3 - Consommation d'énergie relative au transport urbain de personnes, ventilée par type de véhicules
 Données colligées à partir d'études diverses



Moyen de transport	capacité nombre de passagers	consommation moyenne kcal/vkm	taux d'utilisation %	consommation pour un taux d'utilisa- tion de 100 % kcal/vkm
Voiture particulière R.U.	4	560	32,5	185
Autobus à impériale R.U. 9 tonnes	75	215	21,5	45
Trolleybus 9 tonnes	75	335	21,5	70
Tram 40 tonnes	150	270	21,5	60
Train diesel 64 tonnes	150	170	23,5	40
Train électrique 112 tonnes	250	320	20,0	65
TPBL minitrain 15	15	175	40,0	70
Light transit 40 tonnes	240	240	21,0	50
LNE train tube (métro) 840	840	320	12,5	40

Tableau 4 - Comparaison de la consommation énergétique de divers moyens de transport public selon des sources anglaises

Référence : 24



Consommation d'énergie
kcal/vkm.

Transport urbain de voyageurs
Voitures particulières

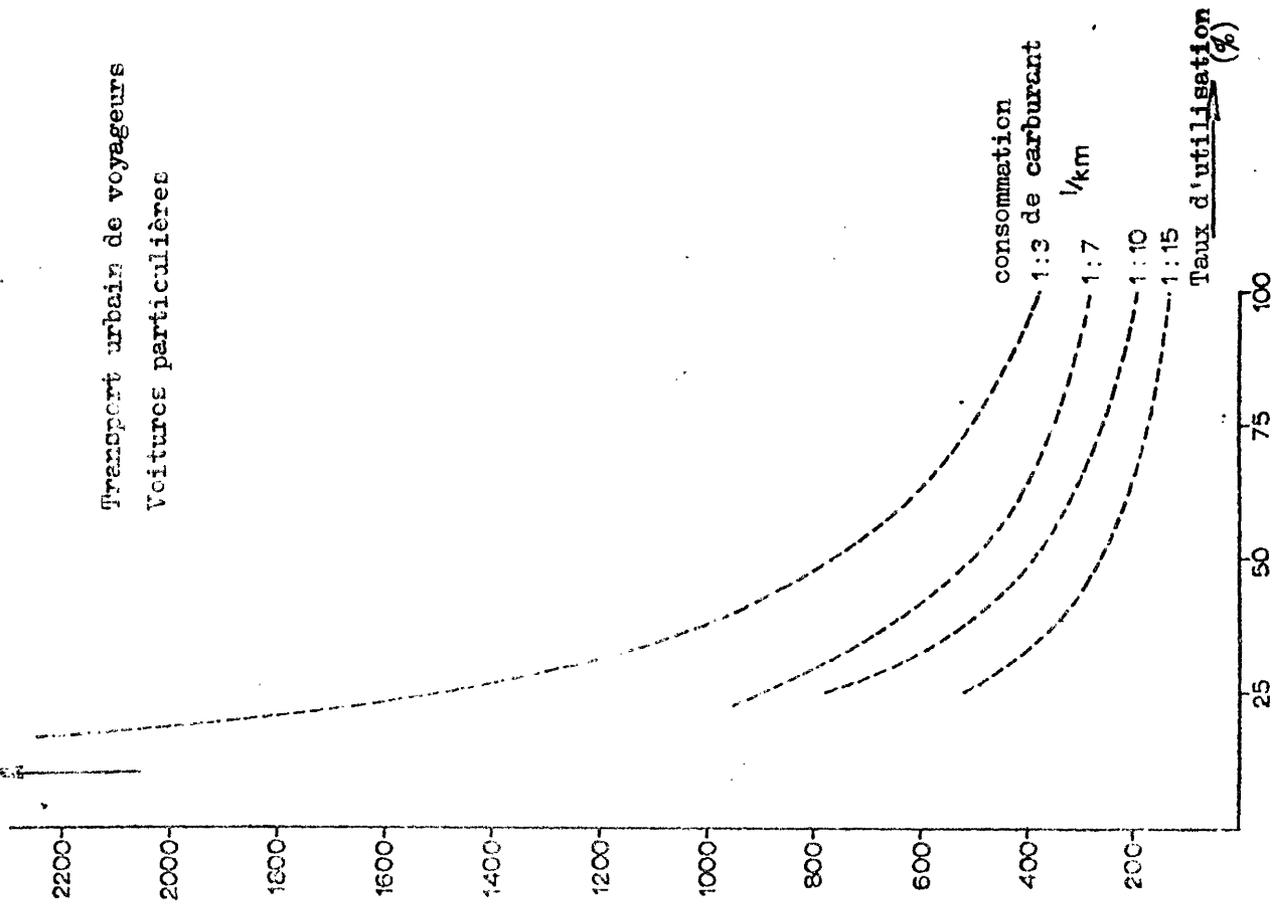


DIAGRAMME 4 RELATION ENTRE LA CONSOMMATION D'ENERGIE ET LE TAUX D'UTILISATION
Dispersion possible de la consomm.



Consommation d'énergie
kcal/vkm.

Transport urbain de voyageurs
Moyens de transport divers

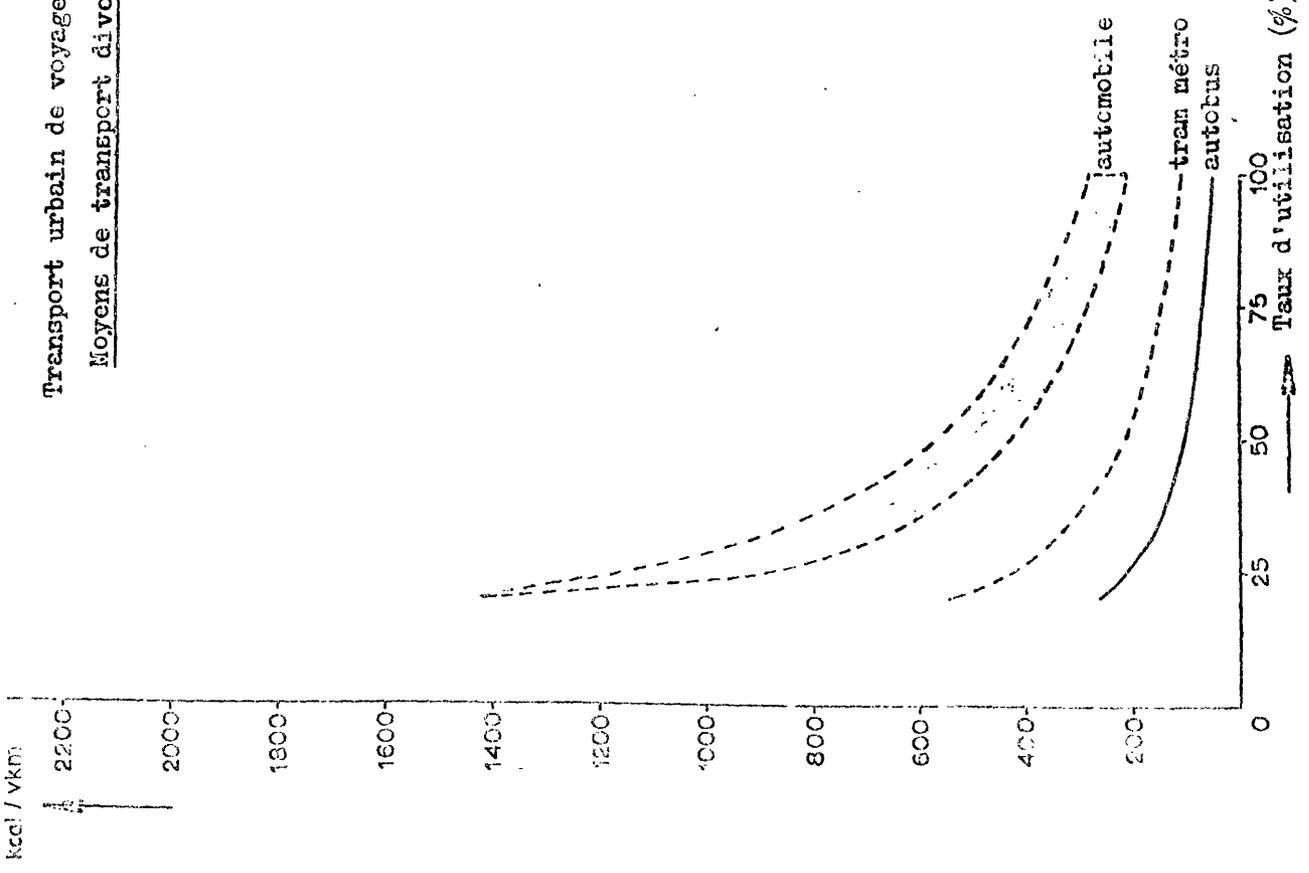


DIAGRAMME 3 RELATION ENTRE LA CONSOMMATION D'ENERGIE ET LE TAUX D'UTILISATION



Consommation d'énergie

kcal/vkm

Transport urbain de voyageurs
Autobus (diesel)
poids à vide : environ 9 tonnes
nombre de places : 50-100

2200
2000
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200

25 50 75 100

Taux d'utilisation (%)

consommation de carburant
varie de 1 : 2 à
1 : 3 l/km

max. 50 places

max. 100 places

Taux d'utilisation (%)

DIAGRAMME 5 RELATION CONSOMMATION D'ENERGIE/TAUX D'UTILISATION
Dispersion possible de la consommation

Transport urbain de voyageurs
Tram - métro

Consommation d'énergie

kcal/vkm

Transport urbain de voyageurs
Autobus (diesel)
poids à vide : environ 9 tonnes
nombre de places : 50-100

2200
2000
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200

25 50 75 100

Taux d'utilisation (%)

Compilation de plusieurs sources

max.

min.

Taux d'utilisation (%)

DIAGRAMME 6 RELATION ENTRE LA CONSOMMATION D'ENERGIE ET LE
TAUX D'UTILISATION
Dispersion possible de la consommation



Consommation d'énergie

kcc / v km
(2 personnes)

VITESSES PARTICULIÈRES

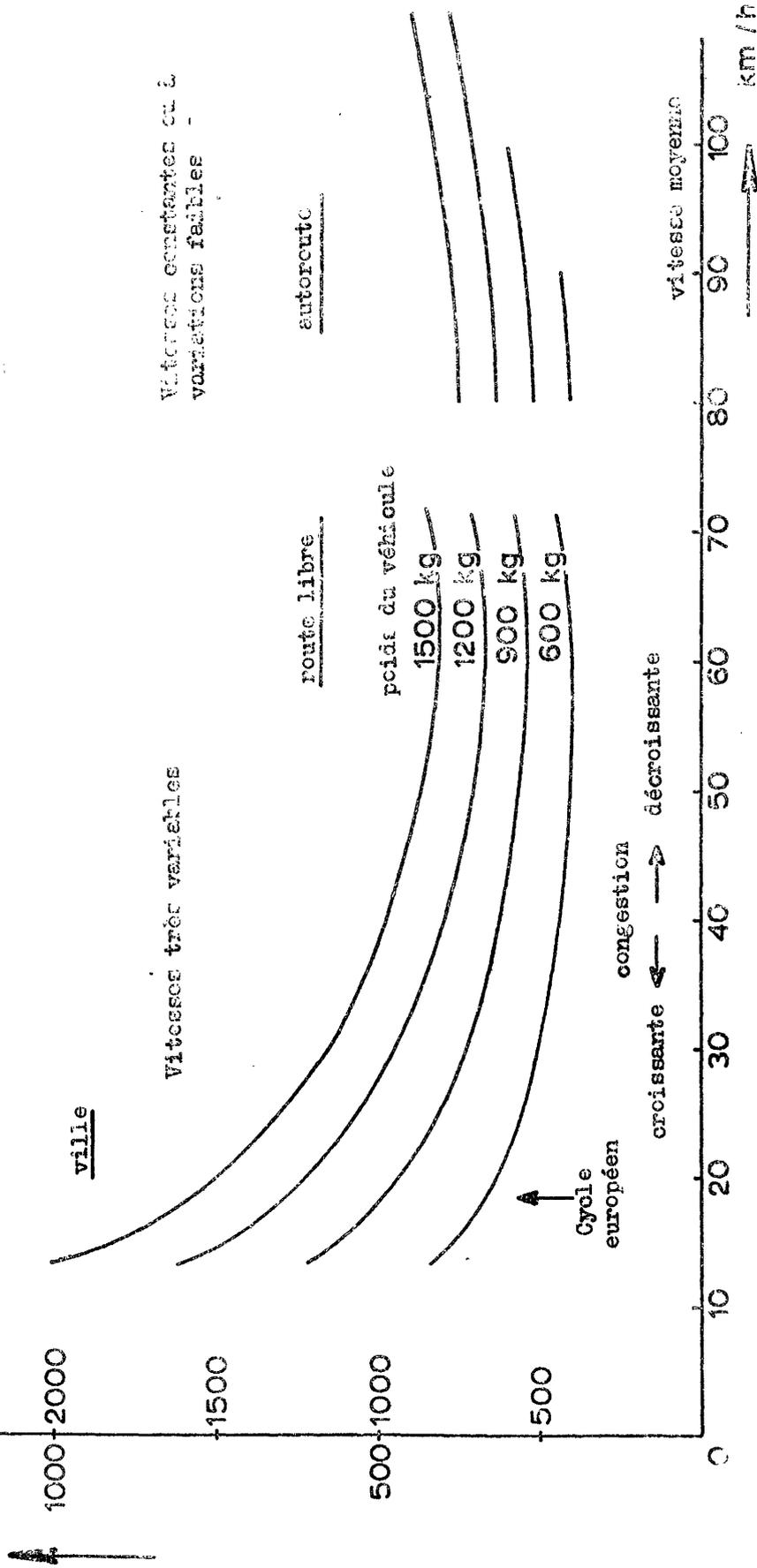


DIAGRAMME 7 INFLUENCE DES PHÉNOMÈNES DE CONGESTION SUR LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE

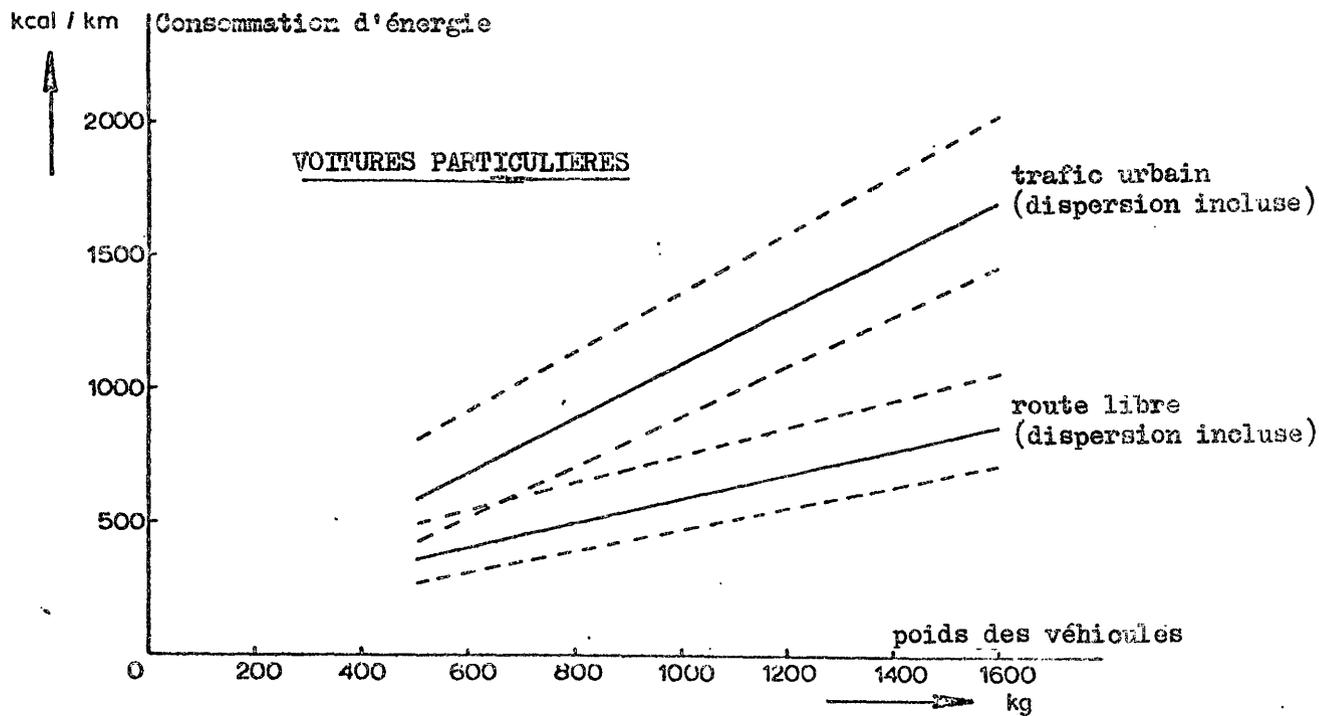


DIAGRAMME 8 INFLUENCE DU POIDS DES VEHICULES SUR LA CONSOMMATION D'ENERGIE

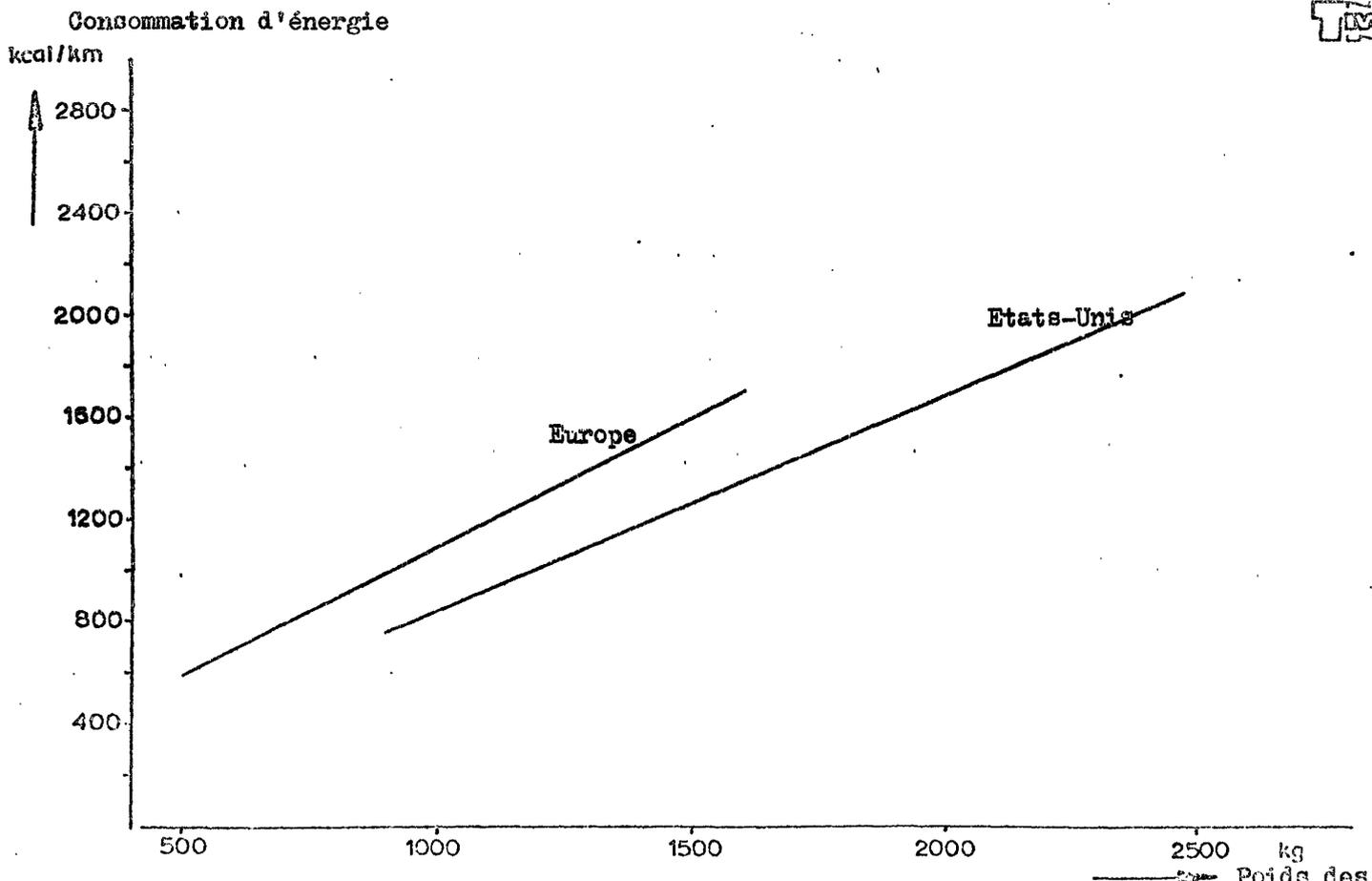


DIAGRAMME 9 RELATION ENTRE LA CONSOMMATION D'ENERGIE ET LE POIDS DES VEHICULES EN TRAFIC URBAIN

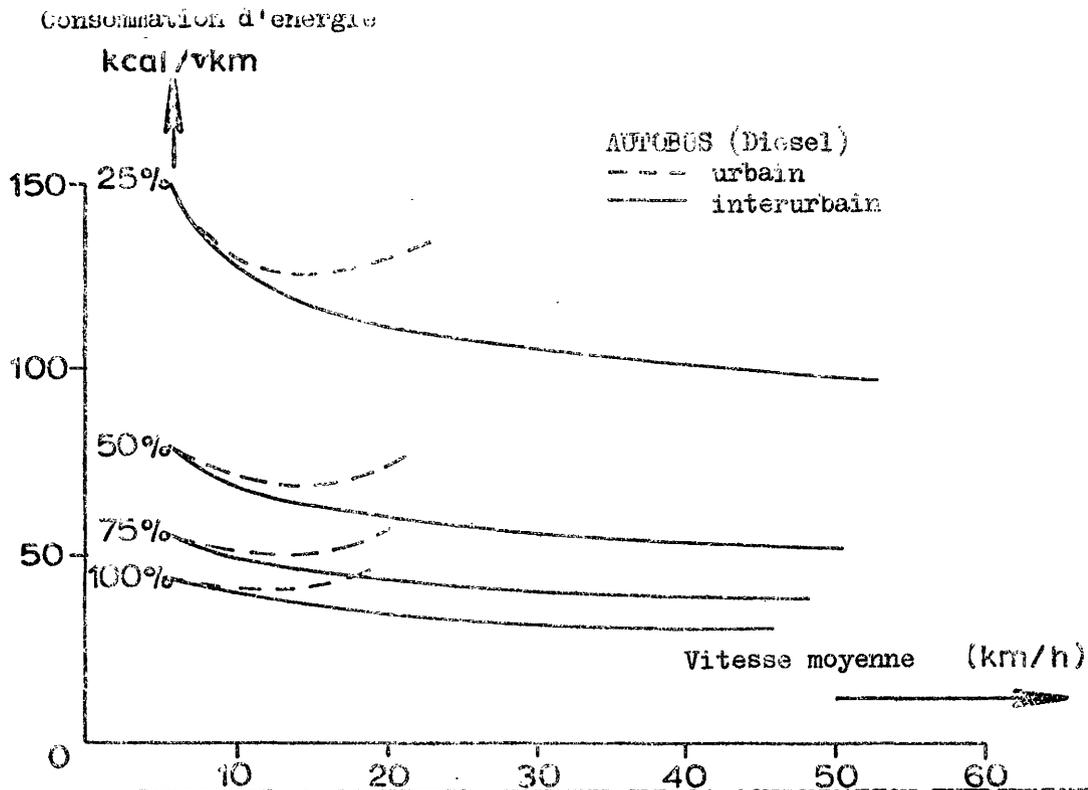


DIAGRAMME 10 INFLUENCE DE LA VITESSE MOYENNE SUR LA CONSOMMATION ENERGETIQUE DES AUTOBUS

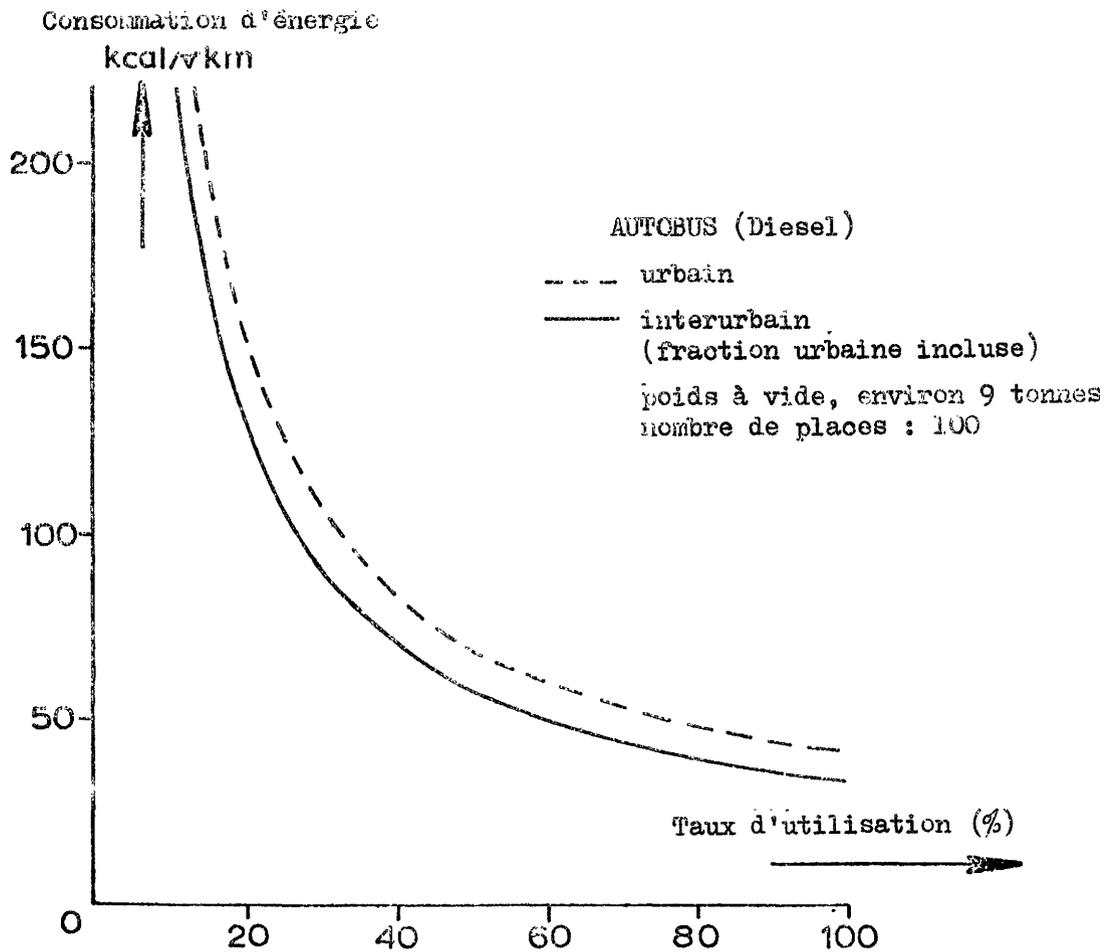


DIAGRAMME 11 RELATION ENTRE LA CONSOMMATION D'ENERGIE ET LE TAUX D'UTILISATION DES AUTOBUS

3. Transport interurbain de voyageurs

Dans le domaine du transport interurbain de voyageurs, la plupart des études sont d'origine américaine, à l'instar de ce que l'on observe en matière de transport urbain de voyageurs. Le tableau 5 reproduit les chiffres de consommation énergétique relatifs aux automobiles, aux autobus, aux trains et aux avions, assortis, pour chaque moyen de transport, d'une moyenne calculée à partir de ces chiffres.

Les valeurs de consommation mentionnées entre parenthèses ne sont pas prises en considération pour l'établissement de la moyenne, car nous disposons de trop peu d'indications relatives à ces chiffres. Nous avons également repris dans ce tableau de nombreuses valeurs américaines, corrigées pour tenir compte de la haute valeur calorifique du carburant.

L'éventail des différentes vitesses moyennes et le taux d'utilisation ont également été mentionnés. La dispersion des chiffres de consommation trouvés est nettement moindre dans le cas du transport interurbain que dans le cas du transport urbain et les chiffres de consommation sont, par ailleurs, plus favorables qu'en ce qui concerne le trafic urbain. Ceci provient d'un mode de conduite plus régulier, grâce auquel le poids du véhicule exerce une influence moindre sur la consommation. Si nous fixons à 100 l'indice de consommation énergétique d'un autobus par voyageur/kilomètre, nous obtenons la comparaison suivante entre les moyens de transport respectifs :

autobus	=	100
train	=	150
automobile	=	300
avion	=	600

Cette comparaison est valable à l'égard des taux d'utilisation mentionnés dans le tableau. Les consommations énergétiques absolues par moyen de transport aux Etats-Unis et en Europe peuvent varier, mais l'indexation demeure, quant à elle, plus ou moins inchangée.

Si nous n'avons fait aucune différence entre la consommation énergétique des voitures par voyageur/kilomètre aux Etats-Unis et en Europe, c'est parce que divers facteurs déterminants se neutralisent mutuellement dans une certaine mesure ; citons à ce propos la différence de poids des véhicules, les variantes dans le mode de conduite et la vitesse, ainsi que le nombre différent de places assises.

La relation entre le taux d'utilisation et la consommation énergétique pour les divers moyens de transport est reproduite sur le diagramme 12, étant entendu que nous avons négligé l'influence des différences de chargement résultant de la modification du taux d'utilisation.

L'impact de ce facteur n'est que de quelques pour cent. La dispersion de la consommation énergétique par type de véhicule en relation avec le taux d'utilisation est illustrée par les diagrammes 13, 14 et 15, et, pour l'avion, par le diagramme 16. L'étude de ces diagrammes montre également de manière irréfutable que la consommation d'énergie accuse une dispersion moindre que dans le cas du trafic urbain.

Le diagramme 7 reproduit, pour quelques voitures européennes (de poids à vide moins élevé), la consommation énergétique en fonction de la vitesse sur route libre. Les valeurs fournies par le diagramme 7 et qui concernent la vitesse constante s'appliquent encore à une vitesse variable lorsque ces variations d'allure oscillent en moyenne autour des $\pm 20\%$.

En ce qui concerne la consommation énergétique des autobus, ce qui a été dit dans le chapitre consacré au trafic urbain demeure valable dans les grandes lignes. L'influence de la vitesse est reproduite dans le diagramme 10. Cette influence semble être pratiquement nulle en ce qui concerne le domaine de vitesse pris en considération. Dans des régions à densité de population raisonnable, l'espacement des arrêts sera, en moyenne de 2 km environ. Dans ce cas, la vitesse moyenne oscille entre 35 et 40 km/h. Le diagramme 11 reproduit l'influence du taux d'utilisation. A cet effet, nous avons supposé que deux arrêts, distants l'un par rapport à l'autre de 1000 m, avaient été prévus par noyaux d'habitation et que la distance moyenne séparant les noyaux d'habitation était de 4 km.

L'influence du taux d'utilisation semble être identique à ce que l'on observe dans le cas des autobus urbains.

Il en est de même de la capacité de transport des autobus ; voir également à ce sujet le diagramme 14. Si l'on évitait les quartiers d'habitation mêmes, la consommation énergétique n'en fléchirait pas de plus de quelques pour cent, en raison de la faible dépendance de la consommation énergétique par rapport à la vitesse. Mais la vitesse moyenne en serait accrue.

Moyen de transport	Consommation énergétique (*)						Limites de consommation kcal/ v km	Consom- mation kcal/ v km	Limites des vi- tesses moyennes km/h	Taux d'utilisation %
	kcal/ voyageurs km									
Automobile	550	480	570	520	650	610	480 - 650	570	80 - 96	35 - 48
Autobus	145	240	160	(90) 240	(140)	130	130 - 240	190	72 - 96	44 - 46
Train	360	250	250	265	305	275	250 - 430	305	64 - 96	37 - 80
Avion	1100	1180	1310	1060	1040	1040	1040 - 1310	1140	563 - 644	49 - 50
Référence	20	15	5	6	8	9	10	18	conformément aux références citées	

les valeurs entre parenthèses ne sont pas prises en considération pour le calcul de la moyenne (*) consommation directe de carburant ou consommation de carburant destinée à la production d'énergie électrique

Tableau 5 - Consommation d'énergie, par moyen de transport, du moyen de transport interurbain de personnes
Données colligées à partir d'études diverses

Consommation d'énergie
kcal/vkm

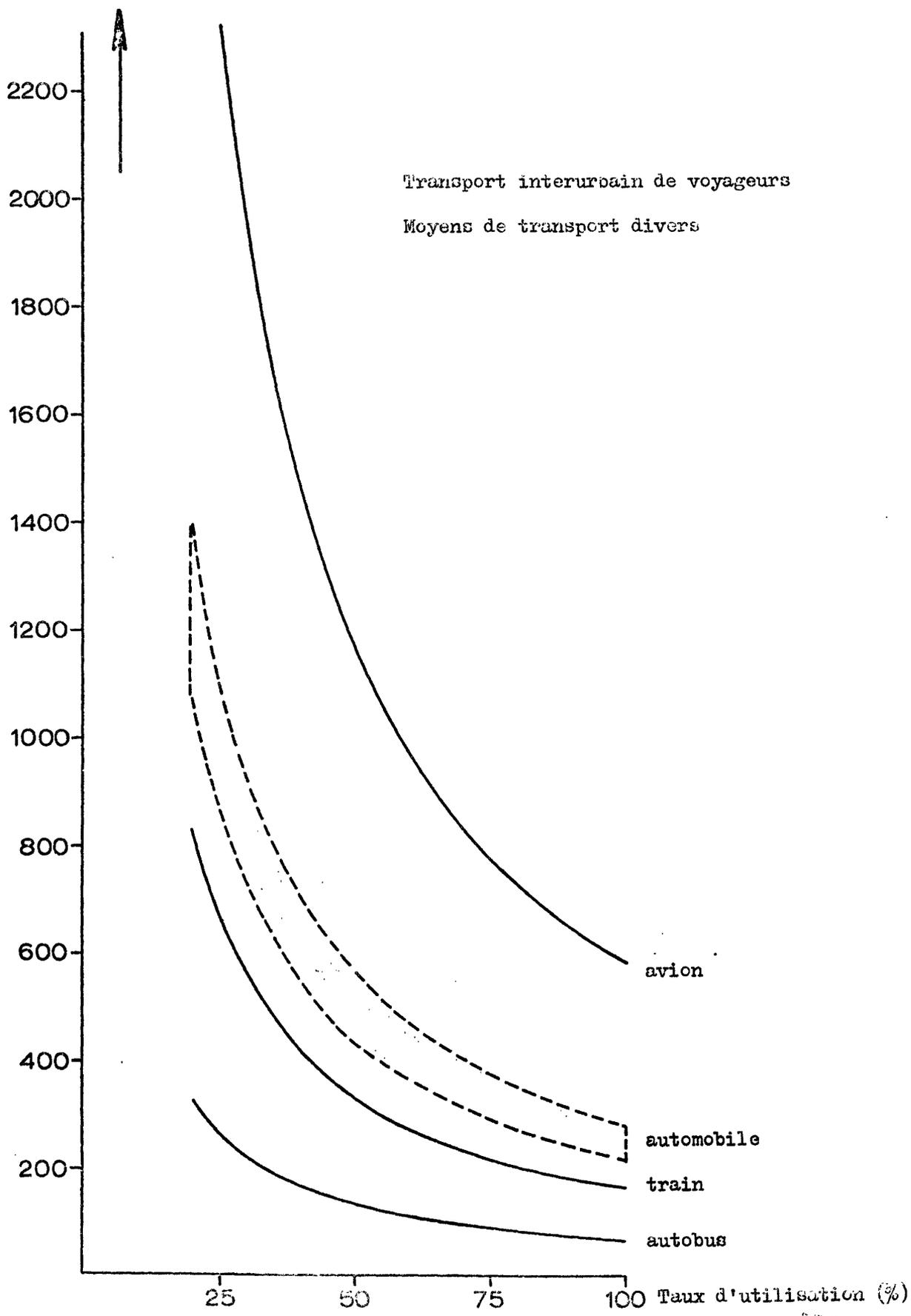
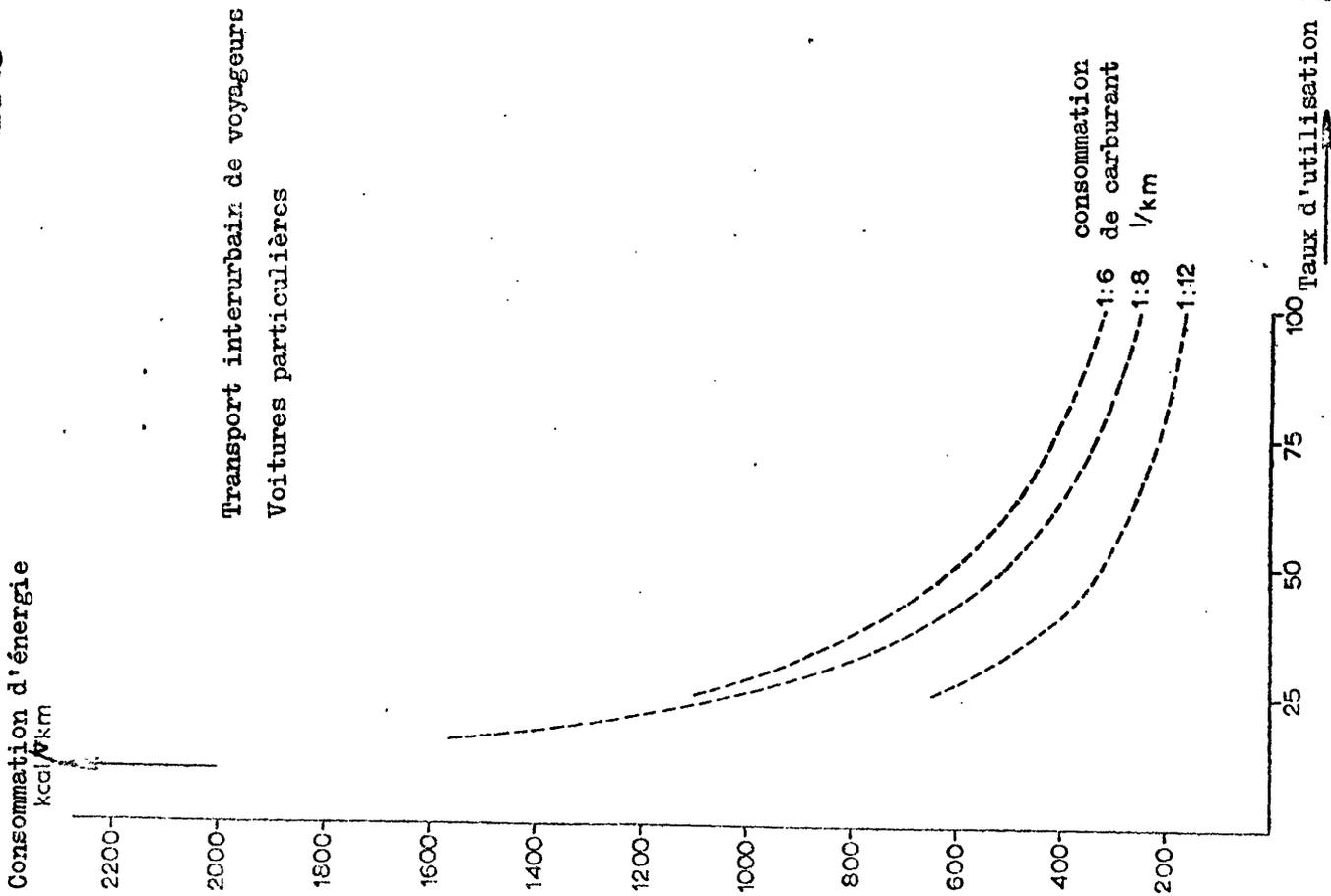


DIAGRAMME 12 RELATION ENTRE LA CONSOMMATION D'ENERGIE ET LE TAUX D'UTILISATION

TW



DIAGR 13 RELATION ENTRE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE ET LE TAUX D'UTILISATION
Dispersion éventuelle de la consommation

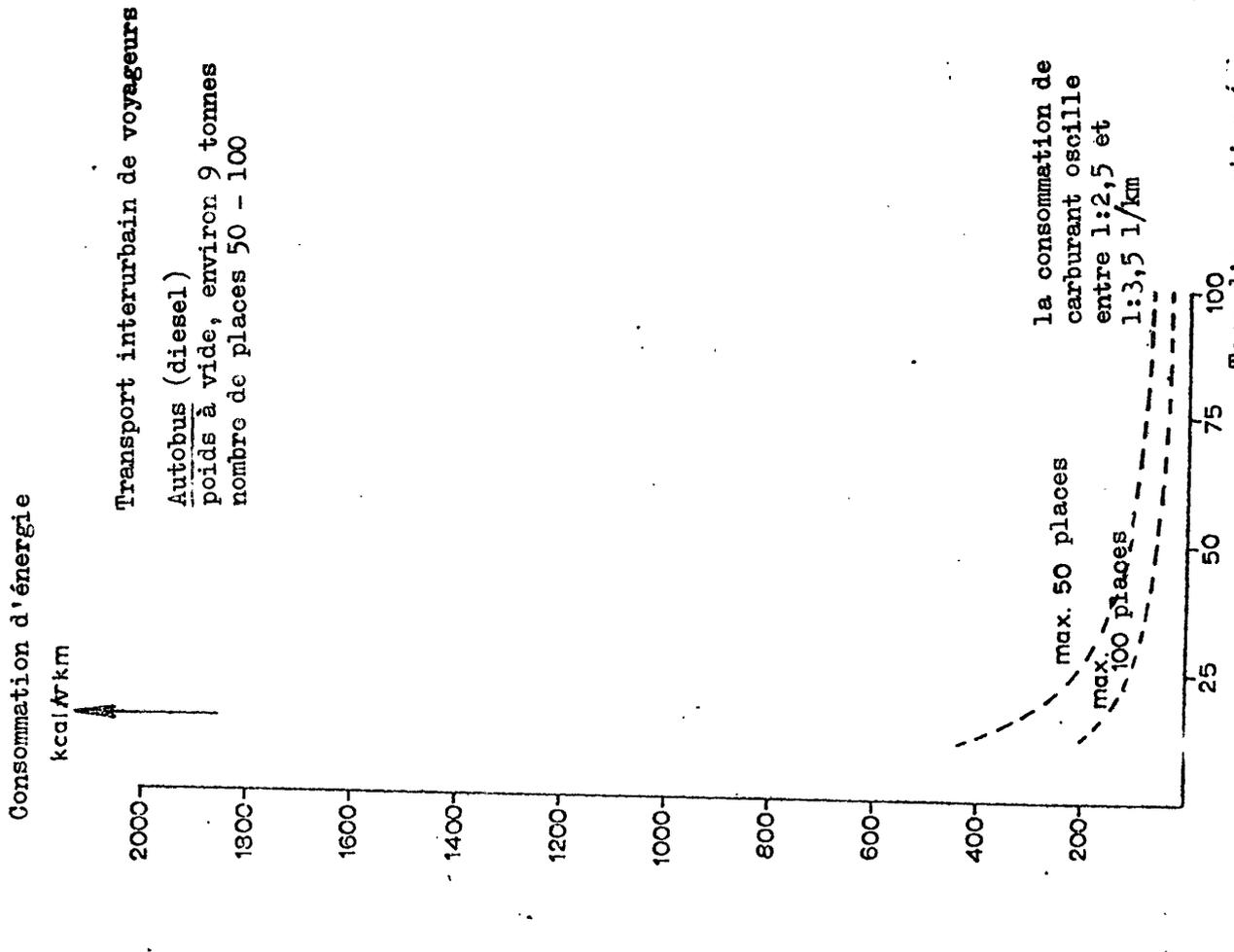
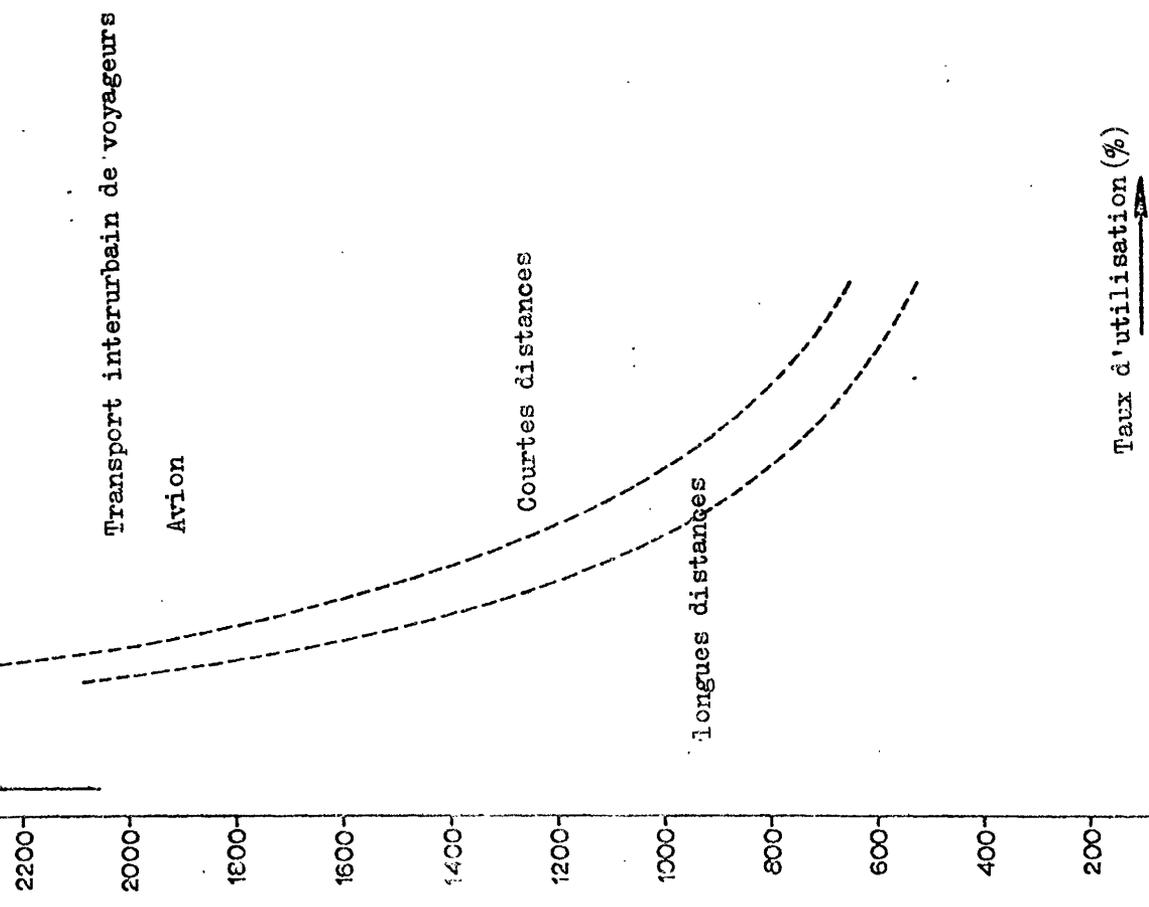


DIAGRAMME 14 RELATION ENTRE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE ET LE TAUX D'UTILISATION
Dispersion éventuelle de la consommation



Consommation d'énergie

kcal/km



Transport interurbain de voyageurs

Avion

Courtes distances

longues distances

Taux d'utilisation (%)

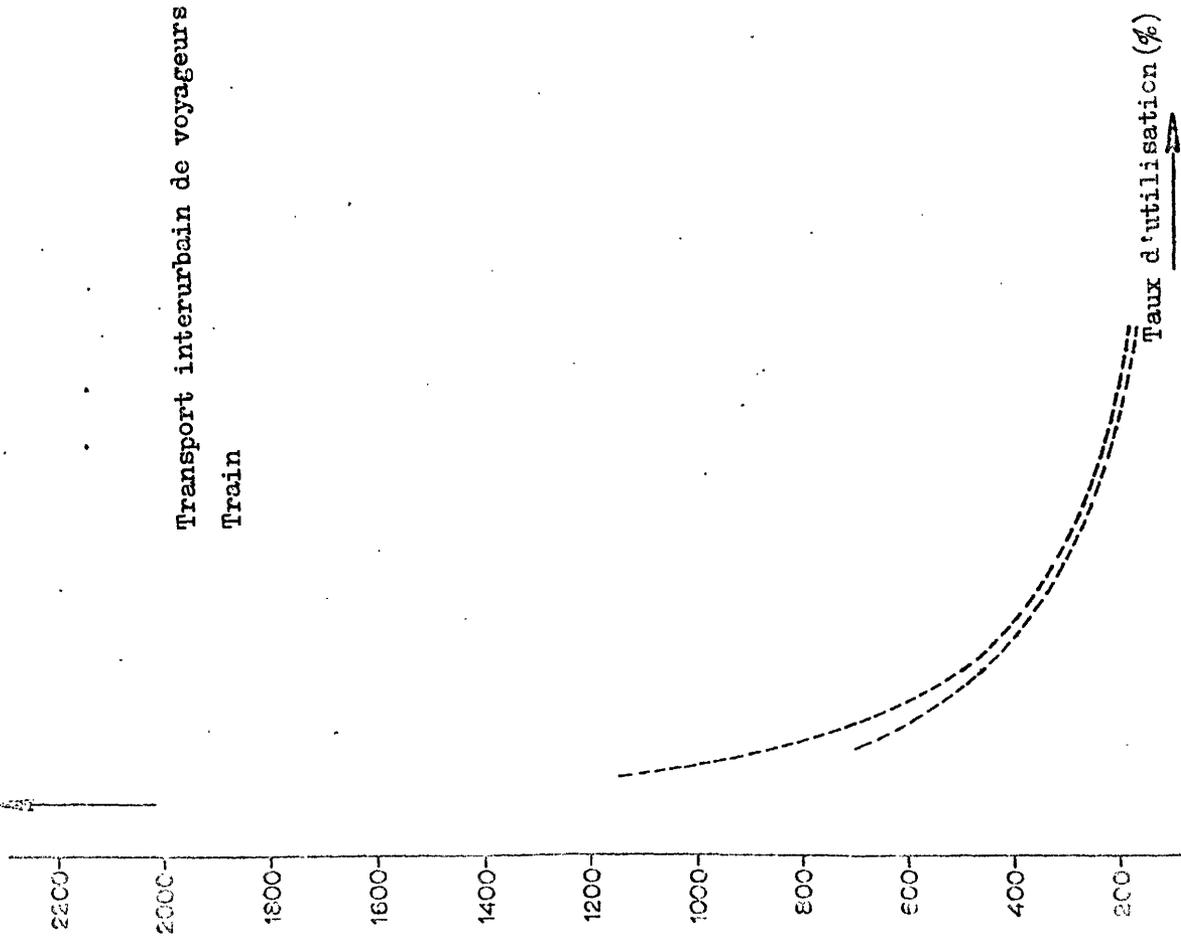
DIAGRAMME 16 RELATION ENTRE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE ET LE TAUX D'UTILISATION

Dispersion éventuelle de la consommation



Consommation d'énergie

kcal/km



Transport interurbain de voyageurs

Train

Taux d'utilisation (%)

DIAGRAMME 15 RELATION ENTRE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE ET LE TAUX D'UTILISATION

Dispersion éventuelle de la consommation

4. Influence de la technique des véhicules sur la consommation énergétique (voir également l'annexe I)

Outre le poids des véhicules et le mode de conduite, qui ont été traités dans les paragraphes précédents, d'autres facteurs influencent encore la consommation énergétique. Dans le cadre d'une étude sur modèle relative aux voitures particulières, on étudie l'influence des grandeurs suivantes: la charge du véhicule, la résistance de roulement, la résistance de l'air et la résistance aux accélérations. On discute en outre, données bibliographiques à l'appui, l'influence sur la consommation énergétique des exigences en matières d'émission, des accessoires, de la transmission automatique et de l'application de quelques autres systèmes de propulsion.

Charge. Le diagramme 17 reproduit l'influence de la charge sur la consommation énergétique. Tant en trafic urbain que sur route libre, cette influence est très faible (de l'ordre de quelques pourcent).

Résistance de roulement. La résistance de roulement d'un véhicule dépend en premier lieu de sa vitesse et de son poids. Les facteurs secondaires qui exercent une influence sur la résistance de roulement sont: la pression des pneus, leur conformation, la composition du caoutchouc de la surface de roulement ainsi que le diamètre du pneu. Pour une voiture (voir diagramme 33) l'influence du coefficient de résistance au roulement sur la consommation énergétique est très faible, tant en ce qui concerne le trafic urbain que l'usage sur route libre.

La résistance aérodynamique croît, quant à elle, comme le carré de la vitesse et elle dépend, dans une mesure moindre, du carénage et des dimensions (relation linéaire).

L'influence des modifications aérodynamiques est négligeable en circulation urbaine; il n'en est pas de même aux vitesses plus élevées sur route libre, où l'aérodynamisme plus ou moins réussi aura une influence sur la consommation énergétique (voir le diagramme 34).

Résistance aux accélérations. Elle est directement proportionnelle au poids du véhicule. Dans le cadre d'un schéma de conduite urbaine, les accélérations fréquentes concordent largement avec un mode de conduite à vitesse moyenne inférieure.

On en revient ainsi aux phénomènes de congestion déjà mentionnés précédemment et qui ont été illustrés dans le diagramme 7.

La dispersion provoquée par tous les facteurs mentionnés ci-dessus a été représentée graphiquement dans le diagramme 8.

En ce qui concerne l'étude sur modèle qui sert de fondement aux diagrammes 7 et 8, on est prié de se reporter à l'annexe I.

Exigences en matière d'émission. Les mesures destinées à réduire la pollution atmosphérique imputable au trafic peuvent avoir un impact relativement important sur la consommation énergétique par véhicule/kilomètre. Les normes américaines relativement sévères en matière d'émission par les voitures particulières se sont traduites par une augmentation sensible de la consommation au cours de la dernière décennie. Le diagramme 18 fait état de cette influence.

L'aggravation de la situation est d'environ 3% dans le cas du trafic interurbain. En Europe, où les normes en matière d'émission en vigueur sont nettement moins sévères, ces exigences ne se sont pas encore traduites par une consommation d'énergie accrue par véhicule/kilomètre.

Accessoires. Aux Etats-Unis, un grand nombre de voitures sont équipées d'accessoires tels que le conditionnement d'air (climatisation) et la direction assistée. Ces dispositifs peuvent entraîner un accroissement sensible de la consommation énergétique, compte tenu de la température extérieure et de la vitesse, ce qui peut conduire à un surcroît de consommation susceptible d'atteindre environ 20% en circulation urbaine. Le diagramme 19 illustre cette surconsommation par véhicule/kilomètre, en rapport avec la vitesse du véhicule et une température ambiante de 30°C.

L'incidence de la direction assistée et de la climatisation est sensiblement moindre aux allures couramment pratiquées sur route libre, mais elle est encore de 5 à 10%.

Transmission automatique. Les voitures équipées d'une transmission automatique au lieu d'une boîte de vitesses à embrayage du type classique peuvent accuser, par unité et en circulation urbaine, une augmentation de consommation de l'ordre de 10 à 15%. En circulation interurbaine, cette surconsommation peut osciller entre 2 et 10%.

Autres systèmes de propulsion.

Dans la perspective des exigences futures des Etats Unis en matière d'émissions, qui sont extrêmement sévères, on a développé ces dernières années un certain nombre d'autres systèmes de propulsion, notamment le moteur Stirling. On utilise le cycle fédéral de circulation comme base de comparaison en ce qui concerne les normes d'émission. Ce cycle de circulation est actuellement aussi utilisé en vue de comparer la consommation énergétique des véhicules en circulation urbaine, la consommation urbaine aux Etats-Unis concordant fort bien avec la consommation par l'intermédiaire de ce cycle. Sur le diagr. 20, la consommation énergétique par véhicule/km est portée en fonction du poids du véhicule. Ont été mentionnées les consommations énergétiques des voitures particulières américaines sorties en '73, ainsi que celles qui concernent les modèles 1957-67. En parallèle, nous avons fait figurer quelques chiffres de consommation de voitures équipées d'un moteur diesel. Ils sont de 35 à 60% inférieurs à ceux relevés sur une voiture américaine d'un poids identique mais équipée d'un moteur à essence. Les voitures équipées d'un moteur à piston rotatif, du genre Mazda-Wankel (voir le diagramme), accusent une consommation relativement plus élevée par rapport aux moteurs à essence de conception classique. Nous avons mentionné en outre la consommation énergétique de trois types de voitures dotés d'un moteur à charge stratifiée, à savoir Honda, Texaco et Ford. Il convient toutefois de faire observer à ce propos que ces moteurs ont été optimisés en fonction des premières normes d'émission pour 1976. Si l'on applique des normes moins sévères, la consommation énergétique de ces moteurs pourra sans doute encore être améliorée.

La consommation énergétique à laquelle on peut s'attendre de la part de voitures propulsées par des moteurs à système de combustion externe, tels que Brayton, Rankine et Stirling, a également fait l'objet des projections du diagramme.

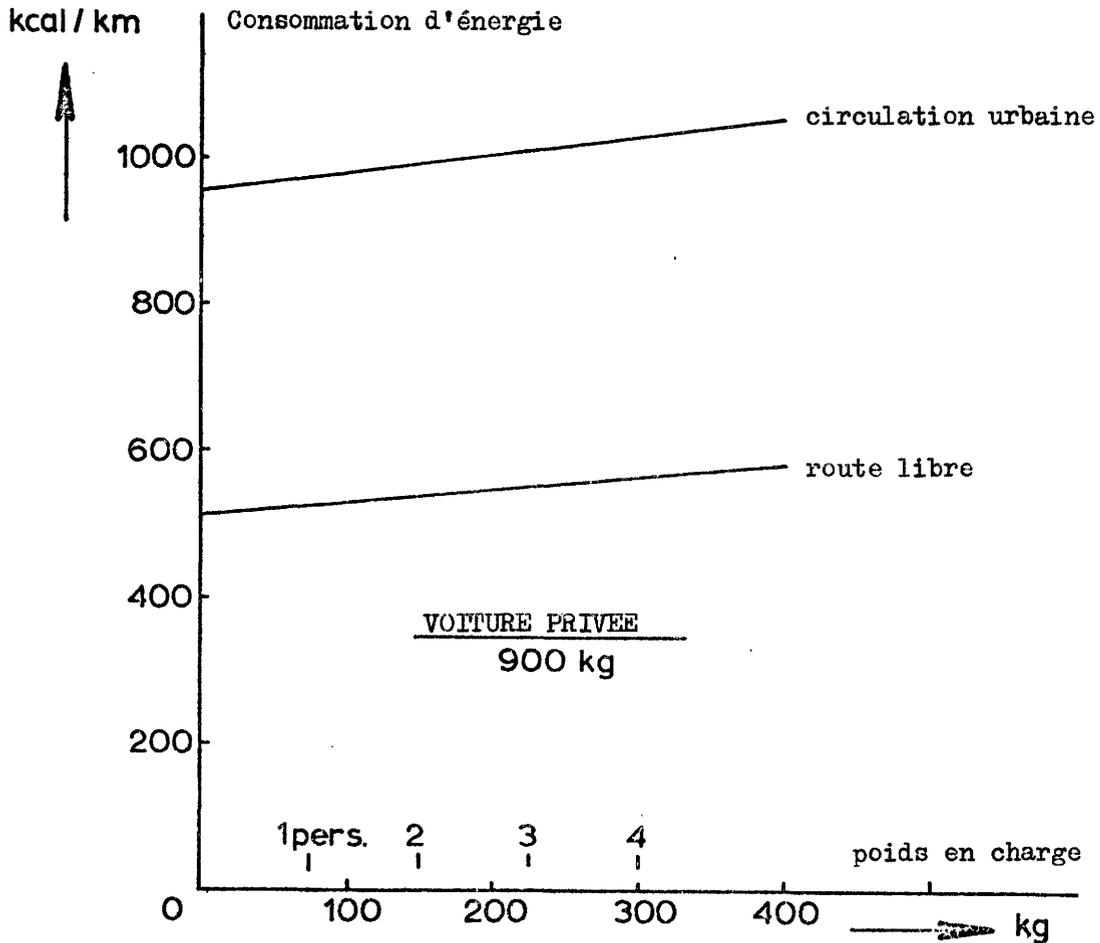


DIAGRAMME 17 INFLUENCE DE LA CHARGE SUR LA CONSOMMATION ENERGETIQUE

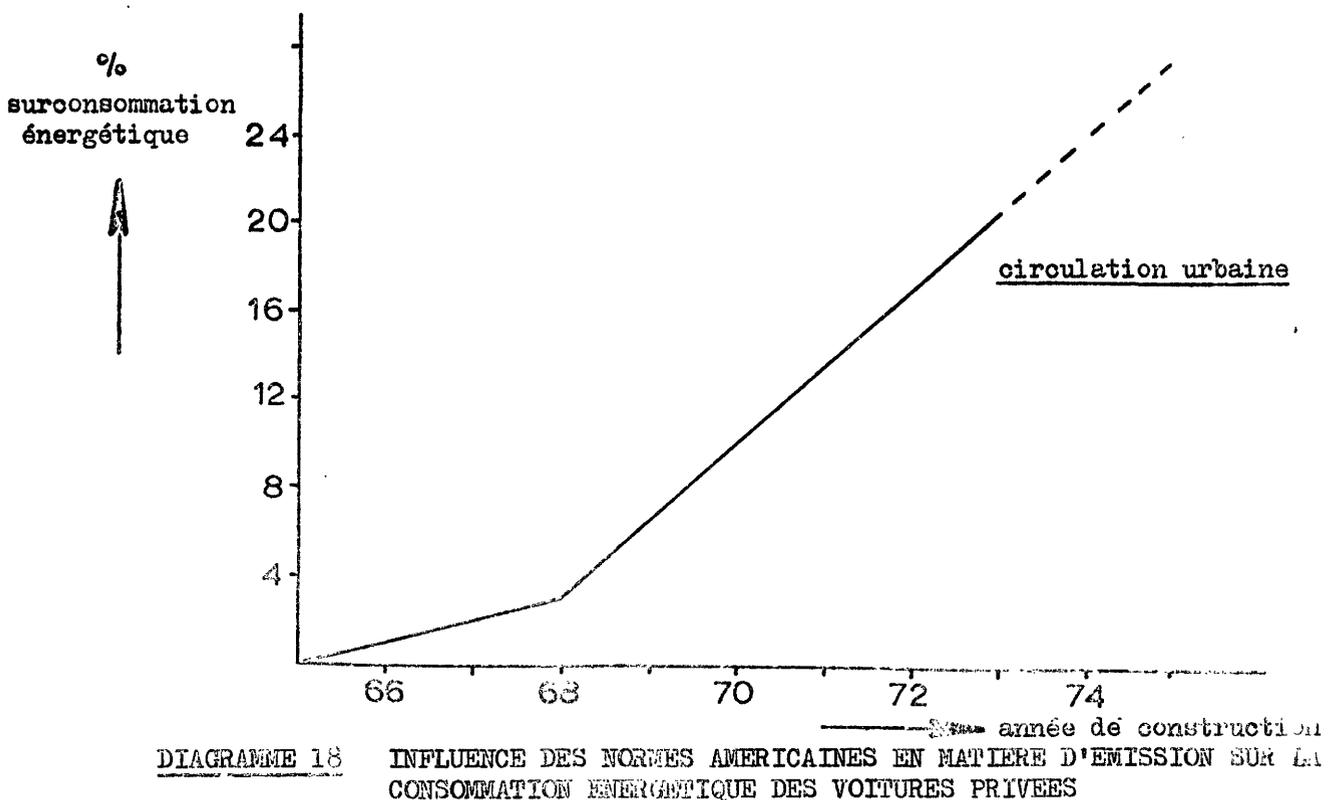


DIAGRAMME 18 INFLUENCE DES NORMES AMERICAINES EN MATIERE D'EMISSION SUR LA CONSOMMATION ENERGETIQUE DES VOITURES PRIVEES

Surconsommation énergétique

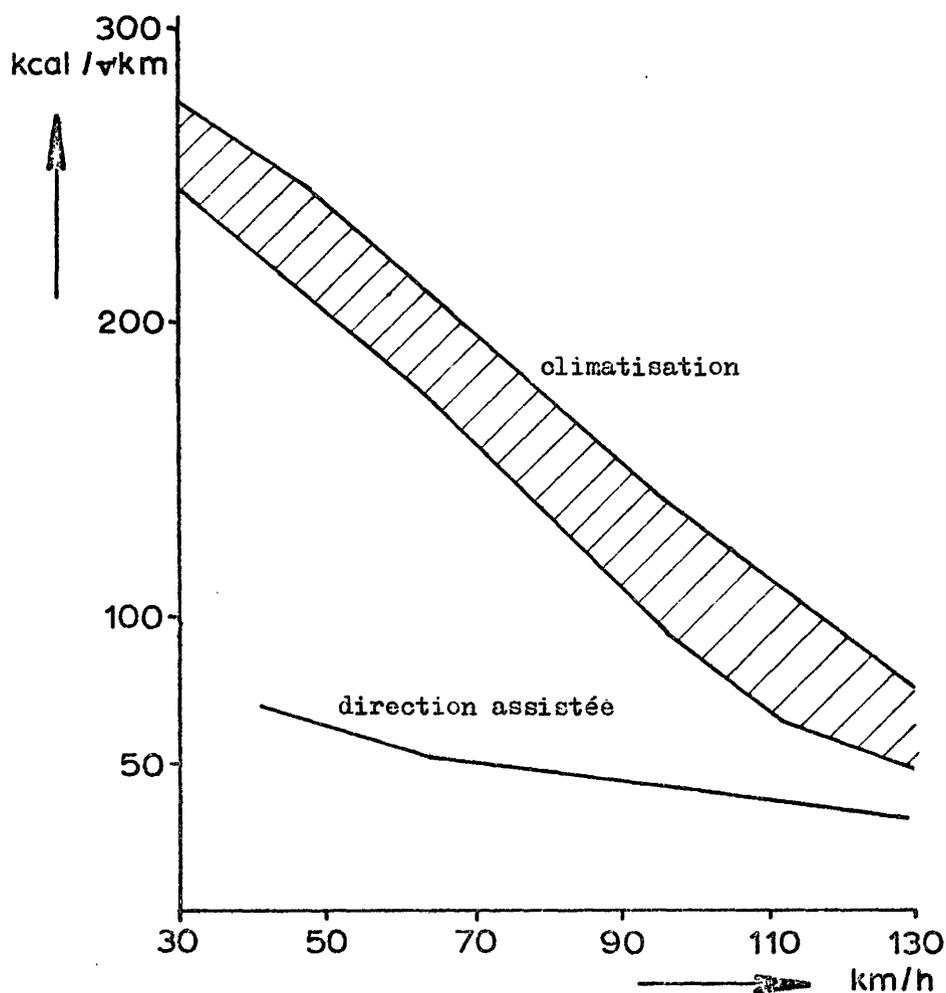


DIAGRAMME 19 SURCONSOMMATION PROVOQUEE PAR DES ACCESSOIRES, TELS QUE LA CLIMATISATION ET LA DIRECTION ASSISTEE, EN FONCTION DE LA VITESSE DE CIRCULATION (voitures privées)

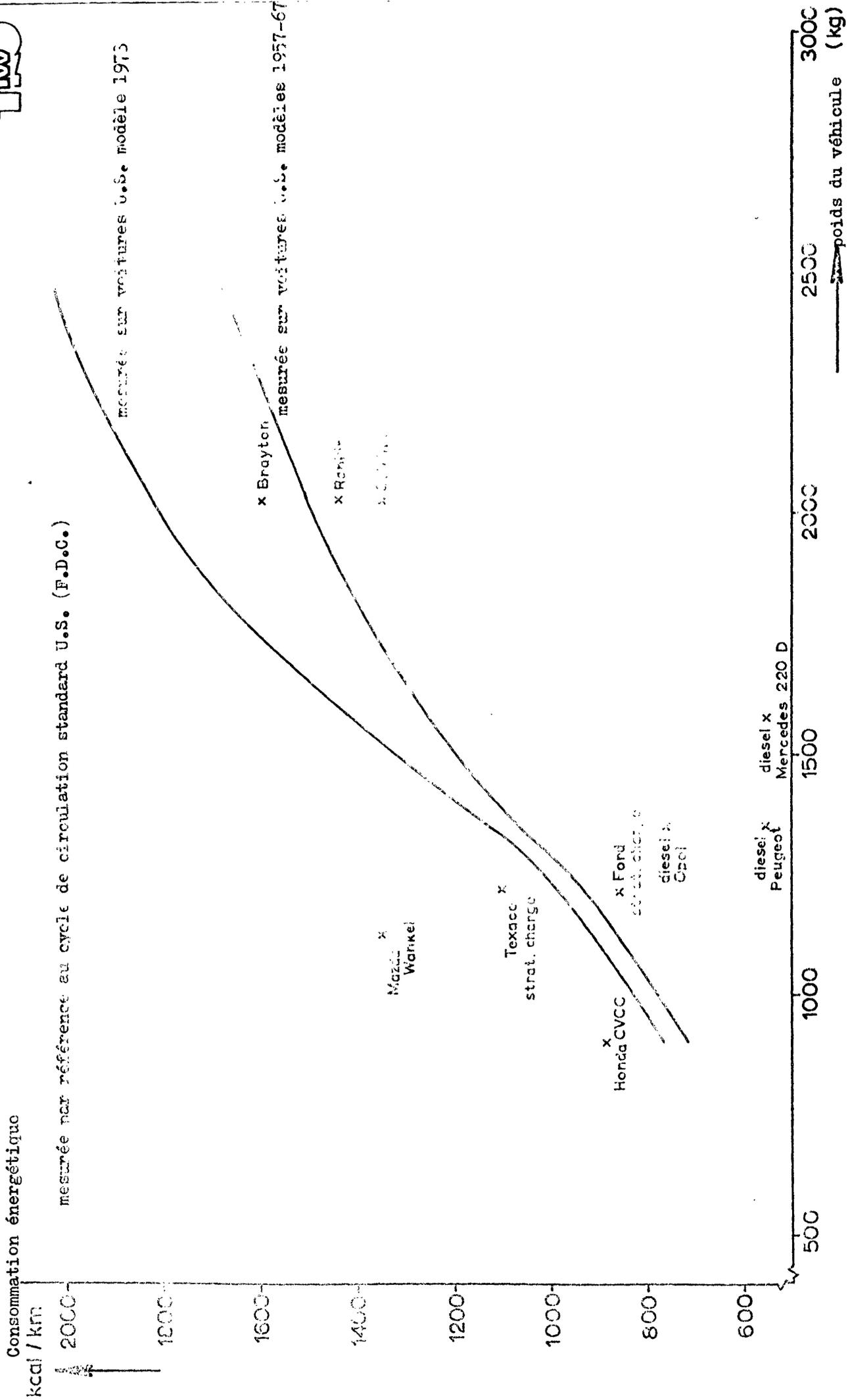


DIAGRAMME 20. CONSOMMATION ENERGETIQUE EN FONCTION DU POIDS DU VEHICULE POUR DIVERS MODELES DE VOITURES PRIVEES

B. Transport de marchandises

1. Généralités

La participation du transport de marchandises à la consommation totale d'énergie dans le secteur des transports est de 20-30% aux USA comme en Europe. Le tableau 6 donne un aperçu du transport total de marchandises (en t/km) effectué actuellement en Europe de l'ouest, aux Etats-Unis et entre les pays industrialisés occidentaux. Certaines prévisions, faites sur la base d'extrapolations de tendances figurent également à ce tableau. On constate en premier lieu que le transport total de marchandises aux USA atteint un niveau 3,5 fois supérieur à celui de l'Europe de l'ouest. Toutefois, l'accroissement est légèrement plus élevé en Europe de l'ouest et il est sensiblement parallèle aux prévisions (effectués avant la crise pétrolière) relatifs à l'accroissement du Produit National Brut: Europe de l'ouest: 4,5% par an et USA: 3% par an environ. On observe certaines différences nettes dans la classification en catégories de moyens de transport dans le secteur du transport de marchandises. En 1970, 21% seulement du nombre total de tonnes-kilomètres ont été assurés aux Etats Unis par les transports routiers, alors que cette contribution était de 48% en Europe de l'ouest. Or, le rapport est inversé lorsqu'on considère la participation du transport par pipeline: USA: 23% et Europe de l'ouest: 7%. Le tableau 7 indique néanmoins qu'il existe des différences considérables entre les pays.

Au niveau européen, nous ne possédons que peu de données sur la répartition du transport routier en transport urbain et transport inter-urbain. Des chiffres fournis par l'Allemagne de l'ouest (1969) et par les Pays-Bas (1972) indiquent une répartition de 50%/50%. En outre, les prévisions montrent qu'il convient de s'attendre à ce que la participation du transport routier augmente et que celle du transport par fer diminue, tant pour l'Europe de l'ouest que pour les Etats-Unis.

En ce qui concerne la totalité des transports entre les pays industrialisés, il est intéressant de signaler l'expansion considérable que prendra le transport par bateau-citerne: de 50% du total en 1960 à 65% en 1990, le tonnage total transporté étant quatorze fois plus élevé.

Nous reviendrons en détail dans les paragraphes suivants sur la consommation d'énergie des divers moyens de transport mais nous avons indiqué au diagramme 21 les changements intervenus dans l'histoire de la consommation d'énergie aux Etats-Unis.

Comme pour le transport de voyageurs (voir diag.2), les seuls changements importants intervenus dans la consommation d'énergie pendant cette période concernent les transports par avion et par train. En effet, la consommation d'énergie du train pendant cette période s'est considérablement améliorée, alors que pour le transport par bateau, la consommation d'énergie par tonne-kilomètre a de nouveau augmenté ces derniers temps. Cette situation semble être la même en Europe de l'ouest où, en ce qui concerne le transport par bateau, l'accroissement de la vitesse est responsable de cette régression.

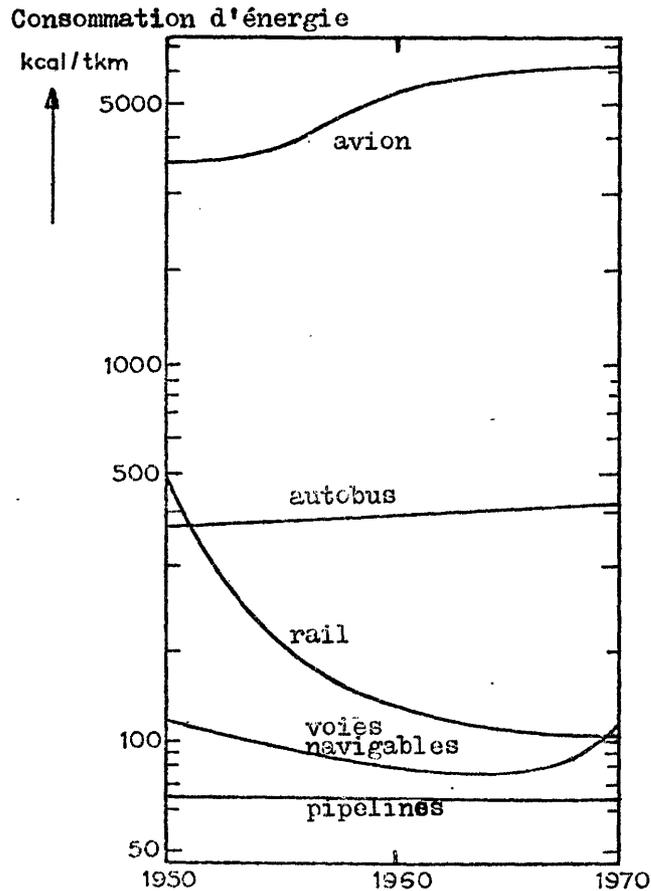


DIAGRAMME 21 VARIATIONS DANS LE TEMPS DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE PROPRE AUX DIVERS MOYENS DE TRANSPORT DE MARCHANDISES

REFERENCE 5

	1960	1970	1980	1990	Croissance annuelle	
					1950-70	1970-90
<u>Total du transport continental des marchandises (tkm 10¹²)</u>						
Etats-Unis	1,94	2,81	3,93	5,35	2,9	3,2
Europe	0,50	0,77	1,20	1,90	4,6	4,5
<u>Pourcentage du nombre total par moyen de transport (en %)</u>						
Etats-Unis	45	39	32	25	0,9	1,0
Rail	16	16	16	15	3,4	2,8
Voies navigables	21	21	26	32	4,5	5,3
Route	--	--	--	1	14,0	12,1
Avion	17	23	25	27	6,3	4,1
Pipeline						
Europe	44	32	26	22	1,5	2,8
Rail	16	13	12	13	5,3	4,4
Voies navigables	40	48	51	52	6,9	5,0
Route	--	--	--	--	--	14,2
Avion	--	7	11	13	--	8,1
Pipeline						
<u>Transport international des marchandises</u>						
Par bateau : marchandises chargées (10 ⁹ tonnes Monde Occidental) dont : bateau citerne marchandises sèches	1,1	2,3	4,7	10,0	7,3	7,7
Transport aérien : 10 ⁹ Tkm en % du transport mondial des marchandises	0,5	1,3	2,9	6,5	9,2	8,5
	0,5	1,0	1,8	3,5	5,7	6,5
	1,3	7,5	43	110	19,2	15,0
	--	--	0,3	2,0	--	--

Tableau 6 - Prévisions du transport des marchandises aux Etats-Unis, Europe et Monde Occidental

Référence : 28

	Route	Rail	Voies navigables (1)	Autres	Prévisions de la partie pour la route 1980
Irlande	84	16	--	--	90
Espagne	83	17	--	--	87
Danemark	79	11	10	--	81,5
Italie	75	24,5	0,5	--	80
Royaume-Uni	61	20	17	2	64
Pays-Bas	54	7	38	1	60
Belgique	47	29	24	--	55
France	38	39	8	15	40
République féd. d'Allemagne	34,5	35,5	21	9	35,5
Norvège	28	23	44	5	37

Tableau 7 - Répartition du trafic de transport des marchandises en Europe

Référence : 28

(1) Pour quelques pays le cabotage a été inclus.

2. Facteurs importants

Des études sur le plan micro-économique nous montrent que les facteurs qui interviennent dans le secteur du transport des marchandises sont: le type de marchandises à transporter, la distance à parcourir et la charge utile disponible des différents moyens de transport.

Afin d'avoir une idée plus exacte de la consommation d'énergie par tonne/km, nous commencerons par étudier les développements dont ces facteurs ont fait l'objet.

Type de marchandises à transporter

En l'absence de données européennes générales sur les différents types de marchandises transportées, il est impossible de dissocier les marchandises de détail des marchandises en vrac (en tenant compte, éventuellement, du transport en conteneur). Quelques données chiffrées en provenance des Pays-Bas permettent néanmoins de se faire une idée plus précise à ce sujet (tableau 8).

Dans le présent ouvrage, nous distinguerons 4 catégories principales de marchandises:

- a) les matières brutes et les combustibles
- b) les produits agricoles et les denrées alimentaires
- c) les produits semi-finis et les matériaux de construction manufactures
- d) les produits finis.

On constate qu'aux Pays-Bas, par exemple, 73% de la totalité du tonnage transporté relève des catégories a) et b), qui peuvent être qualifiées probablement de marchandises en vrac. En ce qui concerne la participation de chaque moyen de transport, on peut admettre que la contribution du transport routier augmente et que la contribution du transport par rail/voie d'eau décroît lorsque les quantités de produits finis transportés augmentent.

Compte tenu du pourcentage relativement faible (7%) que le transport par rail représente aux Pays-Bas (voir tableau 7), ces pourcentages ne peuvent être utilisés qu'à titre indicatif pour l'Europe.

Il est évident que chacune des quatre catégories présente encore de grandes différenciations, eu égard notamment aux différences de compacité, de volume, etc.

Distance à parcourir

Les données dont nous disposons au sujet du transport routier nous permettent d'avoir un aperçu du sujet. En partant de la situation micro-économique considérée, on constate que les marchandises en vrac qui doivent parcourir de longues distances sont généralement transportées par bateau ou par rail et que, par conséquent, le transport routier concerne surtout les marchandises dont le poids est moins important et la destination assez proche. Les données chiffrées fournies par la Grande-Bretagne et par les Pays-Bas montrent que, pour un parcours inférieur à 50 km, la participation du transport routier au tonnage total est de 88% et que 80% de tous les transports routiers appartiennent à cette catégorie.

Lorsque les distances sont plus longues, les autres moyens de transport deviennent concurrentiels: c'est ainsi que, sur une distance de 200 km, la participation du transport routier est encore de 70-80% alors que, sur une distance de 400 km, elle n'est déjà plus que de 73% et de 54% pour 800 km (chiffres pour les Pays-Bas).

La distance à parcourir intervient dans l'étude concernant la consommation d'énergie par tonne/km; en effet, lorsque les distances sont plus longues, il est plus facile de maintenir une vitesse élevée optimale et ce facteur influence favorablement la consommation d'énergie.

Charge utile disponible par moyen de transport

Dans tous les systèmes de transport que nous étudions, cette "capacité utile" relève dans l'ensemble d'une catégorie de poids nettement différente: quelques tonnes pour le transport par avion, 5-20 tonnes au maximum pour le transport routier et des centaines de tonnes pour le transport par rail et pour le transport par voie d'eau.

Etant donné la part considérable que prend le transport routier dans le secteur des marchandises et vu la possibilité, sur le plan micro-économique à obtenir des améliorations par tonne/km, la plupart des changements apportés à la capacité utile concernent le transport routier.

Le tableau 9 donne un aperçu des changements survenus depuis 1965 en Europe dans trois catégories (< 5 tonnes, 5-10 tonnes, > 10 tonnes); il indique en outre les prévisions effectuées à ce sujet jusqu'en 1980.

On constate que la catégorie qui comprend les poids les plus légers reste relativement stable (en pourcentage) et que la catégorie des poids les plus lourds s'étend au détriment de la catégorie des poids moyens. C'est donc dans les catégories extrêmes que, en raison de sa grande souplesse (par rapport aux autres systèmes de transport), le transport routier est appelé à jouer un rôle.

Afin de pouvoir obtenir des éléments d'information plus détaillés sur la consommation d'énergie, par tonne/km de marchandises transportées, des différentes catégories de chargement, il conviendra néanmoins de se faire une idée plus exacte du taux de chargement de chaque catégorie.

C'est ce que nous examinerons au paragraphe suivant.



Catégorie de marchandises	Participation en % au tonnage transporté total	Participation du moyen de transport par catégorie de marchandises			
		bateau	rail	route	total
a) matières brutes et combustibles	52,7 %	40	3	57	100 %
b) produits agricoles et denrées alimentaires	20,3 %	14	2	85	100 %
c) produits semi-finis et matériaux de construction manufacturés	15,8 %	8	1	69	100 %
d) produits finis	11,2 %	2	2	96	100 %
Total	100 %				

Tableau 8 - Composition du tonnage total de marchandises transportées par catégorie et participation par moyen de transport (Pays-Bas, 1968)
Référence : 29

03-2-10004

Charge utile en tonnes	1965			1970			1975			1980		
	≤ 5	5-10	> 10	≤ 5	5-10	> 10	≤ 5	5-10	> 10	≤ 5	5-10	> 10
	France	87.7	6.0	4.5	87.2	6.4	6.4	86.4	5.6	8.0	85.1	4.5
Rép.féd.d'Allemagne	79.1	18.0	2.9	77.4	17.1	5.5	75.9	17.1	7.0	74.4	18.1	7.5
Italie	87.7	7.7	4.6	87.8	7.4	4.8	87.5	7.5	5.0	87.4	7.4	5.2
Grande Bretagne	79.3	14.4	6.3	75.0	15.2	9.8	74.7	10.1	15.2	75.7	7.3	17.2
Pays-Bas	72.3	18.9	9.6	70.8	16.9	12.3	65.3	15.3	19.4	60.2	14.0	25.8
Belgique	73.9	18.4	7.7	70	17.7	12.2	67.0	18.0	15.0	65.0	17.0	18.0
Danemark	88.0	9.9	2.1	86.0	11.4	2.6	81.5	13.5	5.0	79.1	13.9	7.0
Norvège	92.6	6.9	0.3	84.0	14.5	1.5	80.0	16.8	3.2	78.0	17.5	4.5
Espagne	79.0	17.0	4.0	76.6	13.7	7.7	80.1	10.7	9.2	80.8	8.7	10.5
Suède	64.7	26.8	8.5	63.2	22.4	14.4	65.5	18.7	15.8	66.0	17.5	16.5
Suisse	<u>70.5</u>	<u>17.9</u>	<u>2.6</u>	<u>73.2</u>	<u>23.3</u>	<u>3.5</u>	<u>71.9</u>	<u>23.6</u>	<u>4.5</u>	<u>70.5</u>	<u>23.5</u>	<u>6.0</u>
Total	82.9	12.3	4.8	81.4	11.3	7.3	80.3	10.2	9.5	79.8	9.3	10.9

Tableau 9 - Changements intervenus dans la répartition par catégories de camions en Europe (1965-1980)
(en pourcentage de l'ensemble du parc de poids lourds)

3. Consommation d'énergie

Aucune différenciation n'a été établie en transport urbain et transport interurbain, lors des études sur le transport de marchandises. Or, il s'en faut de beaucoup que tous les moyens de transport conviennent au transport urbain: citons notamment le bateau, le pipeline et le transport par avion. D'ailleurs, à notre époque, le transport par chemin de fer est, lui aussi, très peu utilisé dans les villes. C'est pourquoi le transport urbain sera surtout effectué par route, avec des voitures de livraison et des camionnettes.

Les chiffres dont nous disposons pour la consommation d'énergie par tonne/km transportée, comme il est indiqué au tableau 10, concernent la totalité du transport interurbain de marchandises et proviennent des USA.

La fiabilité des chiffres n'est pas meilleure que lorsqu'il s'agit du transport de voyageurs. Le tableau indique en outre les chiffres obtenus pour la vitesse moyenne ainsi qu'un minimum de données chiffrées sur le taux de chargement: le transport aérien de la KLM atteint un taux de chargement de 52-53%, alors que pour le transport routier des Pays-Bas, ce taux est d'environ 76% pour 66% des voyages chargés. Cette absence relative de données augmente encore les difficultés auxquelles se heurte celui qui cherche à établir une comparaison par moyen de transport.

Les chiffres dont nous disposons pour le transport par pipeline sont des estimations et il est donc impossible de porter un jugement sur leur exactitude.

On peut admettre néanmoins que la consommation d'énergie liée au transport par bateau et par pipeline est sensiblement la même, alors que le transport par chemin de fer dépasse ce taux d'environ 25% en moyenne. La consommation d'énergie par tonne/km transportée par fer dépend toutefois dans une large mesure de la longueur du train de marchandises.

Une étude américaine nous fournit les chiffres ci-après:

train de marchandises de 40 wagons -	220 kcal/tonne-km
train de marchandises de 100 wagons -	87 " "
train de marchandises de 200 wagons -	50 " "

D'après les données du tableau, le transport par route consomme environ 4 fois plus d'énergie que le transport par bateau ou par pipeline. Il convient néanmoins de signaler que la consommation d'énergie liée au transport par route dépend dans une grande mesure du tonnage du moyen de transport routier utilisé.

Si nous fixons à 100 la consommation d'énergie par tonne/km du transport par rail, nous obtenons les chiffres approximatifs suivants:

bateau	75
pipeline	60
rail	100
route	300
avion	4000

Bien que cette comparaison ait été empruntée en grande partie à des études américaines, on a constaté néanmoins, en faisant un parallèle avec la seule étude européenne connue, à savoir celle qui a été effectuée par la "Stichting Toekomstbeeld der Techniek" que cette indexation était également valable pour l'Europe.

Le diagramme 22 nous donne une image de la consommation d'énergie par tonne/km transportée par rapport au tonnage brut, pour un taux de chargement de 100%.

Or, si nous souhaitons comparer le transport par chemin de fer avec le transport par route, il convient de ne pas perdre de vue que, pour les longues distances sur route, les véhicules utilisés sont presque toujours des camions dont les tonnages varient de 32 à 38 tonnes environ. La consommation d'énergie de ces véhicules se situe au même niveau que celle d'un petit train de marchandises de 40 wagons environ.

Presque tous ces moyens de transport ont, outre un poids maximal admissible, un volume fixe pour les marchandises à transporter, de sorte que la compacité du chargement est amenée à jouer un rôle. Un camion de 38 tonnes a un volume de chargement de 70-80 m³, aussi ce volume ne peut-il être utilisé entièrement que pour une compacité moyenne de 0,3-0,35 kg/dm³. Lorsque les compacités sont moindres, le volume total peut être utilisé; par contre, la charge utile ne peut plus être utilisée.

Dans le cas des camions citernes et des silos servant au transport en vrac, le contenu de la citerne est généralement adapté au contenu à transporter, ce qui permet d'utiliser dans tous les cas le tonnage intégral de charge utile.

La consommation d'énergie des voitures de livraison a été calculée pour deux cas (voir aussi l'annexe II):

- une voiture de livraison de la catégorie 1a dont le poids brut maximal admissible est de 1500 kg et la charge utile de 500 kg (moteur à essence);
- une voiture de livraison de la catégorie 1b dont le poids brut maximal admissible est de 3400 kg et la charge utile de 1600 kg (moteur à essence et moteur diesel).

La variation de la consommation en fonction de la vitesse, pour un chargement de 50%, est indiquée au diagramme 23. La variation en fonction du taux de chargement est indiquée au diagramme 24, sur la base du trafic urbain. L'ensemble correspond aux diagrammes obtenus pour les voitures privées. Toutefois, la valeur réelle de la consommation par tonne/km est évidemment influencée dans une large mesure par la relation poids brut/poids en charge. Lorsque ces voitures sont équipées de moteurs diesel, il est possible de réaliser une économie d'énergie de 10-20%.

Nous possédons peu d'éléments d'information sur l'effet exercé par la vitesse moyenne sur la consommation d'énergie des camions lourds.

On peut admettre cependant que celui-ci correspond en principe à l'effet de la vitesse moyenne sur la consommation d'énergie des autobus interurbains.

Le tableau 10 montre que cet effet est très limité dans une large gamme de vitesse. La relation, illustrée au diagramme 25, entre la vitesse moyenne et la consommation d'énergie pour les camions (avec remorque et voiture motrice avec semi-remorque) dont le poids total est de 38 tonnes et dont le chargement varie de 21 à 25 tonnes pour un taux de chargement de 100%, n'est pas absolument exacte, vu que le ralentissement de la vitesse est dû aux pentes existant sur le trajet mesuré.

Le diagramme 26 indique la consommation d'énergie par tonne/km pour les poids lourds, avec différents taux de chargement. Ces données ont été empruntées à une étude sur laquelle nous reviendrons à l'annexe II.

Dans le présent chapitre et à l'annexe II, nous emploierons à diverses reprises l'expression "poids du train brut admissible". Nous entendons par là le poids maximal admissible des camions avec remorque et des voitures motrices avec semi-remorque. Les données qui indiquent la consommation d'énergie du diagramme 26 ne tiennent pas compte de la répartition en catégories, telle qu'elle est prévue à l'annexe. Bien que des types de moteurs différents soient utilisés pour les différentes catégories de poids lourds, les "excursions" de consommation d'énergie semblent peu importantes. C'est pourquoi la consommation a été indiquée sur la base du poids du train brut admissible, qu'il s'agisse d'une seule voiture ou d'un ensemble de véhicules. La charge utile est la moyenne prise dans la bande de dispersion figurant à l'annexe. Il est évident que la consommation par tonne/km est fortement influencée par la charge disponible pour un poids brut donné.

La consommation d'énergie par tonne/km augmente fortement, surtout dans le cas des petits véhicules, lorsque le poids brut admissible diminue. C'est ainsi que la consommation augmente de 50 % environ lorsque le poids brut admissible passe de 38 à 14 tonnes, mais elle augmente de 150 % environ lorsque le poids brut admissible passe de 14 à 4 tonnes; ce fait est en corrélation avec le rapport défavorable poids brut admissible/capacité de charge des véhicules plus légers.

On trouvera au diagramme 27 la consommation d'énergie relative, exprimée en fonction du taux de chargement, pour divers poids bruts admissibles. Dans l'ensemble, ce diagramme correspond au précédent. On constate ici également que la consommation relative augmente lorsque le rapport poids du véhicule/ poids en charge devient défavorable, ce qui est le cas pour un taux de chargement plus faible. On constate néanmoins que la consommation par tonne/km pour un véhicule de 5 tonnes dont le taux de chargement est de 75% est aussi élevée que celle d'un véhicule de 10 tonnes dont le taux de chargement est de 40 %, d'un véhicule (ou d'un "train") de 22 tonnes chargé à 25 % et d'un "train" de 38 tonnes chargé à 20 %.

Nous avons indiqué au diagramme 28 la consommation d'énergie par tonne/km pour un chargement d'un poids donné, lorsqu'on utilise différents véhicules ou différents ensembles de véhicules. La consommation semble augmenter, comme on pouvait s'y attendre, lorsque les véhicules sont plus grands (plus lourds). On constate d'ailleurs plus, par exemple, qu'un camion de 4 tonnes qui transporte un chargement G consomme davantage par tonne/km qu'un 22 tonnes dont le chargement est de 2G.

En d'autres termes, l'utilisation de véhicules plus grands, voire beaucoup plus grands, est plus favorable sur le plan énergétique lorsqu'elle permet dans l'ensemble de transporter des chargements plus importants.

On note, au cours des dernières années, une tendance à l'augmentation de la puissance installée des poids lourds: jusqu'à 8 cv par tonne de poids du train. Cette augmentation influence défavorablement la consommation d'énergie par tonne/km; en effet le poids à vide du véhicule augmente (moteurs et organes de transmission plus lourds), alors que le poids maximal admissible ne varie pas, ce qui entraîne une diminution de la charge utile.

En outre, l'accroissement de la puissance entraîne une augmentation de la vitesse moyenne.

Cet effet peut néanmoins être compensé dans une certaine mesure par l'emploi d'aluminium pour la construction des poids lourds et des bennes basculantes, ce qui permet d'obtenir une augmentation de la charge utile de 2 tonnes environ, augmentation qui se traduit par une économie d'environ 10-15% de la consommation d'énergie par tonne/km. Des économies supplémentaires considérables peuvent être réalisées d'autre part en donnant un profil aérodynamique aux poids lourds. Des essais effectués à l'aide de "deflector shields" placés sur la cabine ont permis de réaliser des économies de combustible de l'ordre de 15% environ. Un profil aérodynamique entièrement nouveau a eu un résultat de voir une réduction de la consommation de 30-40 % environ.

La consommation d'énergie des poids lourds peut être influencée par d'autres facteurs: limitation du poids maximal admissible par ex. En Angleterre, ce poids est de 32 tonnes en général; il est de 40 tonnes dans la plupart des pays de la CEE. La charge par essieu varie, elle aussi, suivant les pays, par ex. de 6 tonnes sur un essieu avant et de 10 tonnes sur les autres essieux à 13 tonnes sur chaque essieu. De telles réglementations différentes ont une influence défavorable sur la consommation d'énergie, bien que l'effet soit limité, les poids lourds étant classés dans la catégorie la plus lourde.

La consommation d'énergie moyenne par tonne/km peut encore être modifiée par d'autres procédés. En Allemagne par ex., on a recours à des "autorisation par voyage", pour le transport routier, ce qui entraîne une utilisation plus intensive du chemin de fer et, le cas échéant, d'autres véhicules mixtes plus lourds.

L'application de taxes de circulation plus ou moins élevées sur certaines catégories de poids lourds peut donner lieu à des conversions du même genre (utilisation de véhicules plus petits ou plus grands).

Une répartition du parc poids lourds en catégories identiques pour tous les pays est une tâche difficile à réaliser dans la pratique. Pour leurs statistiques, les divers pays d'Europe utilisent des poids différents, tels que poids du véhicule à vide, charge utile et poids maximal admissible. Etant donné qu'il n'existe aucune relation fixe entre ces caractéristiques, il est donc difficile d'en effectuer la conversion.

C'est pourquoi, nous avons employé à l'annexe II une classification moins compliquée que celle qui est utilisée dans certains pays.



05-2-10003

Moyen de transport	Consommation énergétique (*)								Limites de consommation	Consommation moyenne	Limites des vitesses moyennes
	kcal/tonne km										
Voies navigables	80	115	80	100	80	(100)	80-115	90			
Pipelines	(290)	70	70	70	75	(40)	70-75	70		8	
Rail	120	100	200	100	100	(50-220)	100-200	120		32-88	
Route (interurbain)	340	(880)	340	420	400	(370)	340-420	375		65-88	
Avion		3650	1990	5920	(1820)		3650-5920	4850		640	
Préférences	31	11	20	6	5	9	8	conformément aux références citées			

Les valeurs entre parenthèses ne sont pas prises en considération pour le calcul de la moyenne

(*) consommation directe de carburant ou consommation de carburant destinée à la production d'énergie électrique

Tableau 10 - Consommation d'énergie par moyen de transport dans le transport de marchandises



Consommation d'énergie

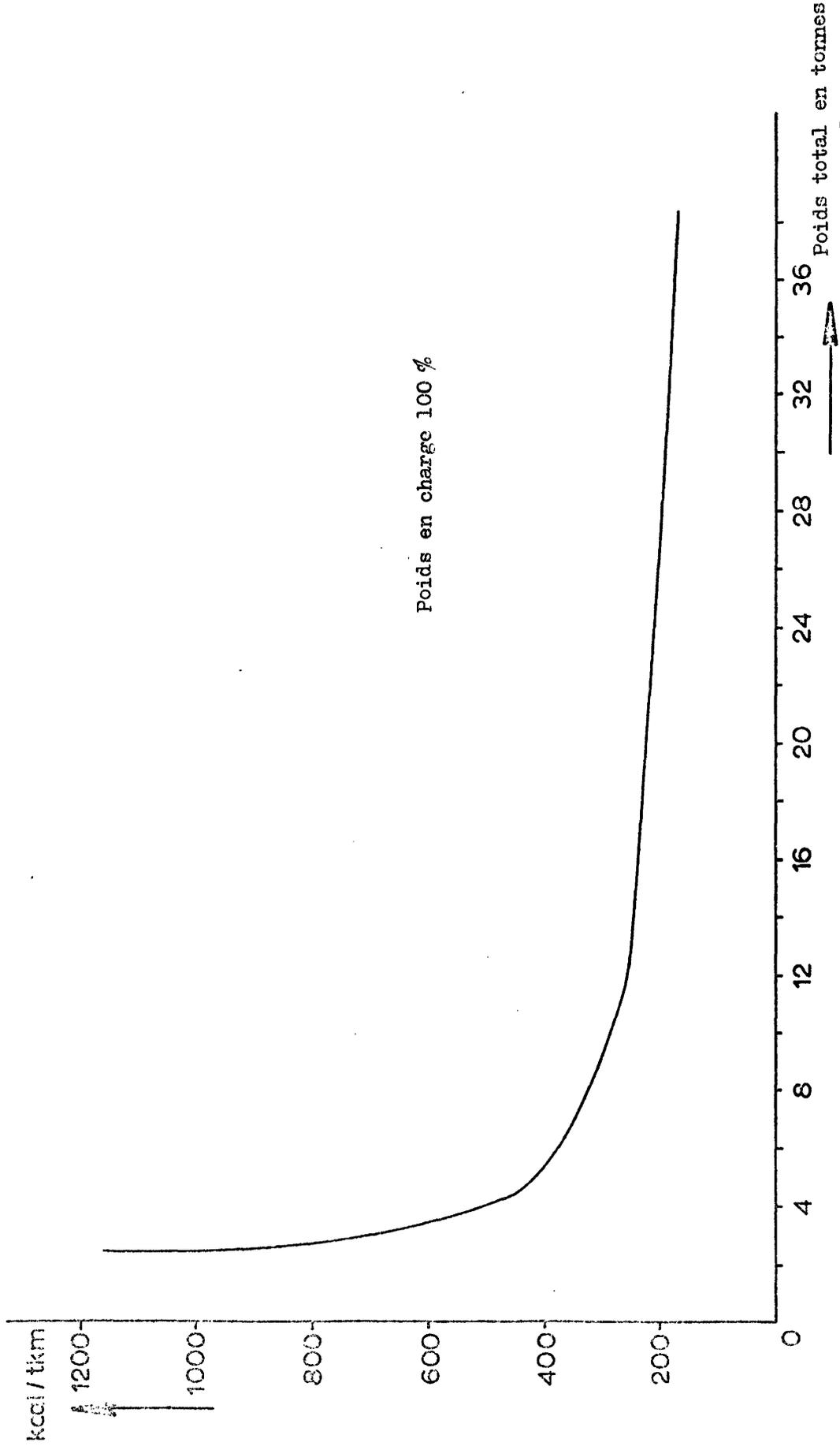


DIAGRAMME 22 CONSOMMATION D'ENERGIE EN RELATION AVEC LE POIDS TOTAL DU VEHICULE

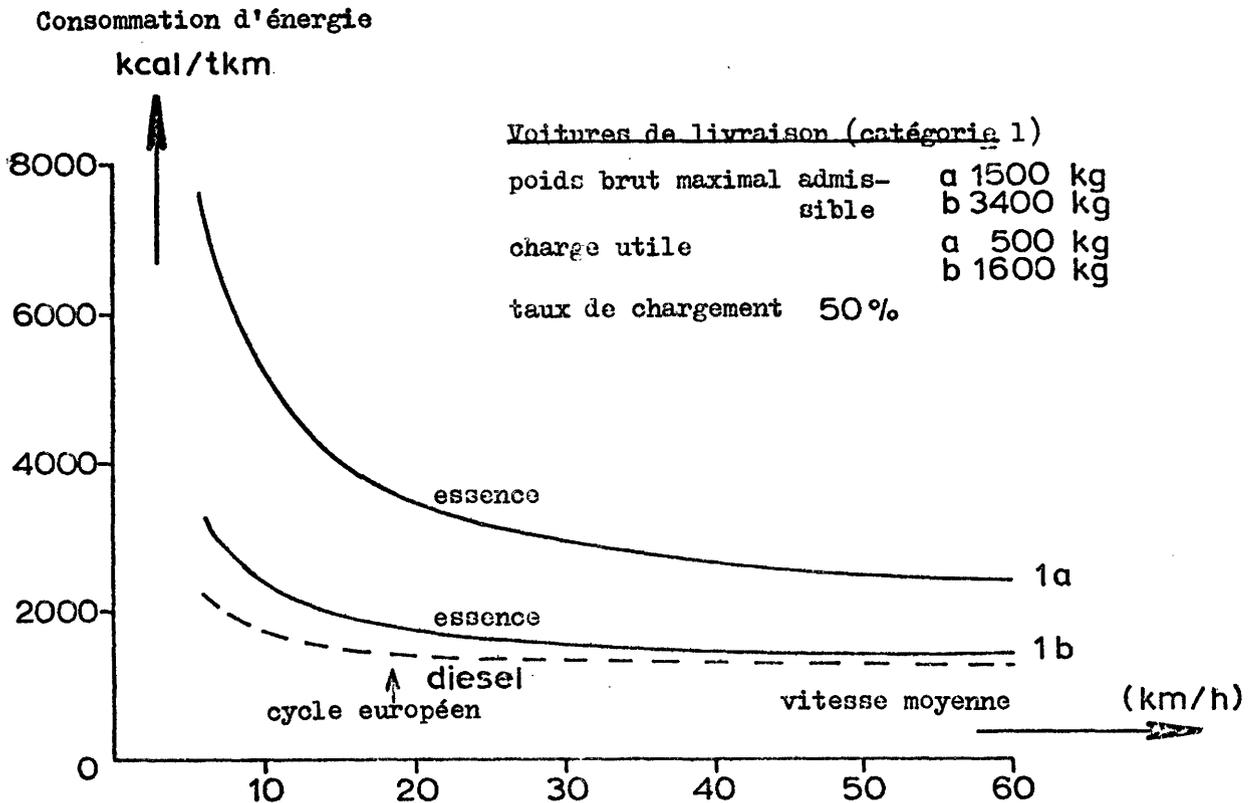


DIAGRAMME 23 RELATION ENTRE LA CONSOMMATION D'ENERGIE ET LA VITESSE MOYENNE POUR LES VOITURES DE LIVRAISON

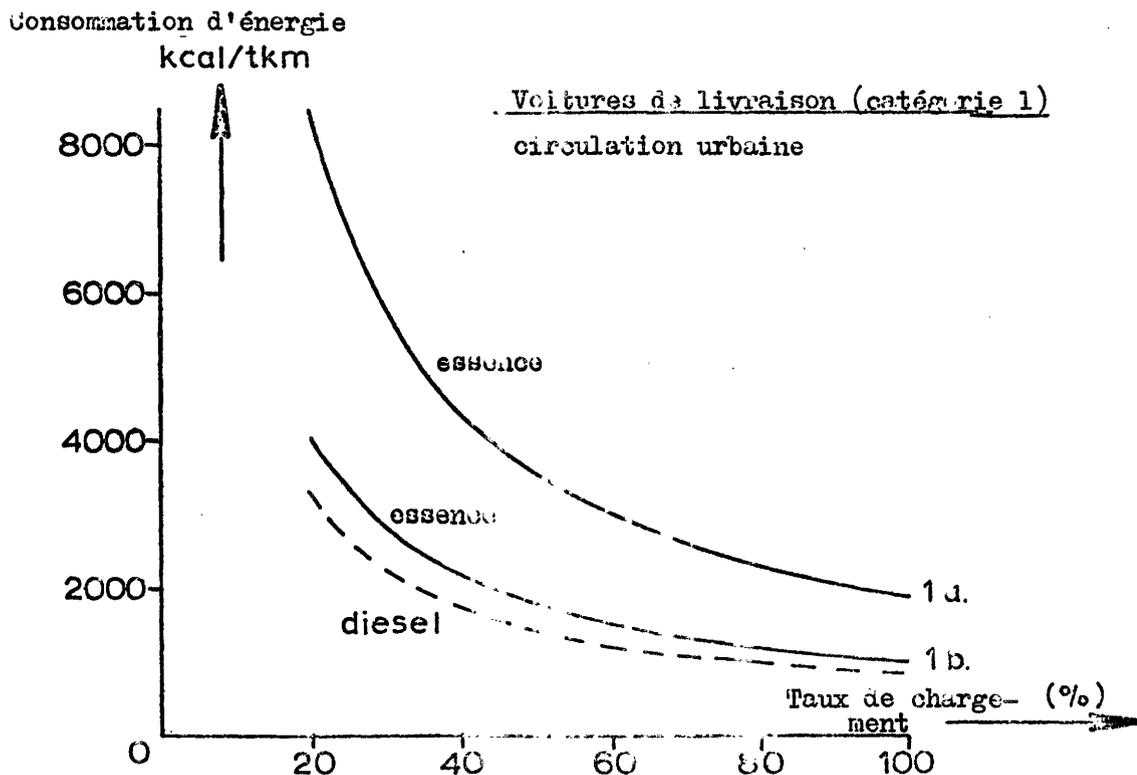


DIAGRAMME 24 RELATION ENTRE LA CONSOMMATION D'ENERGIE ET LE TAUX DE CHARGEMENT POUR LES VOITURES DE LIVRAISON

Consommation d'énergie

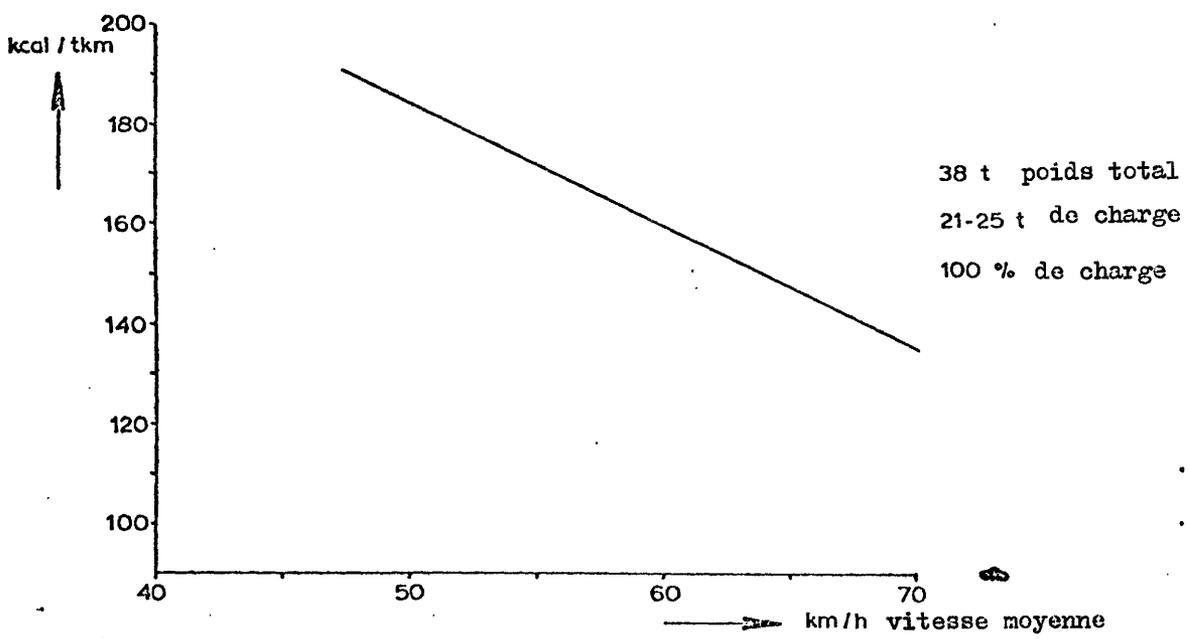


DIAGRAMME 25 RELATION ENTRE LA CONSOMMATION D'ENERGIE ET LA VITESSE MOYENNE

Consommation d'énergie (kcal/t km)

POIDS LOURDS
MOTEURS DIESEL

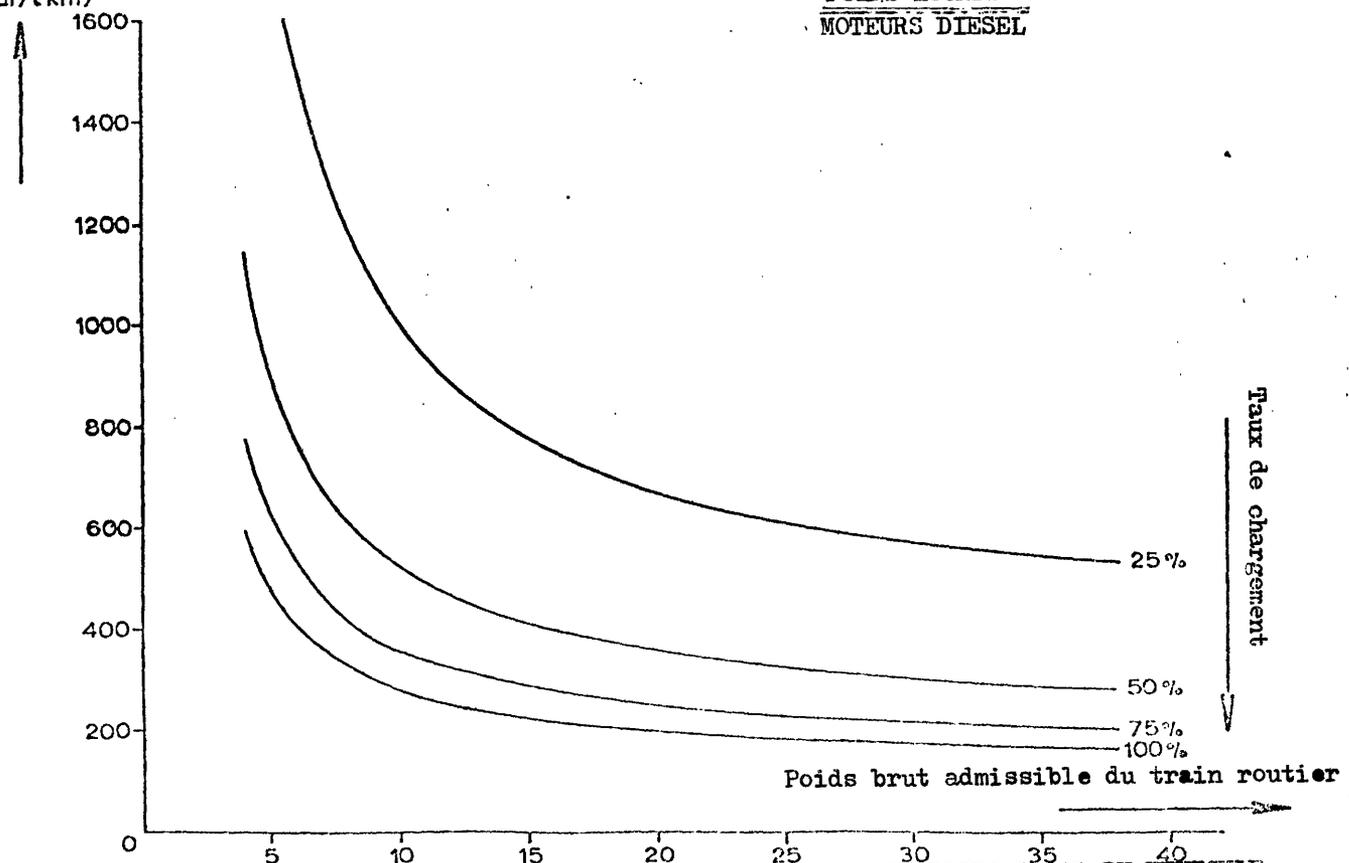


DIAGRAMME 26 CONSOMMATION D'ENERGIE EXPRIMEE EN FONCTION DU POIDS TOTAL DU VEHICULE POUR DIVERS TAUX DE CHARGEMENT

Consommation d'énergie
(kcal/tkm)

POIDS LOURDS
(MOTEURS DIESEL)

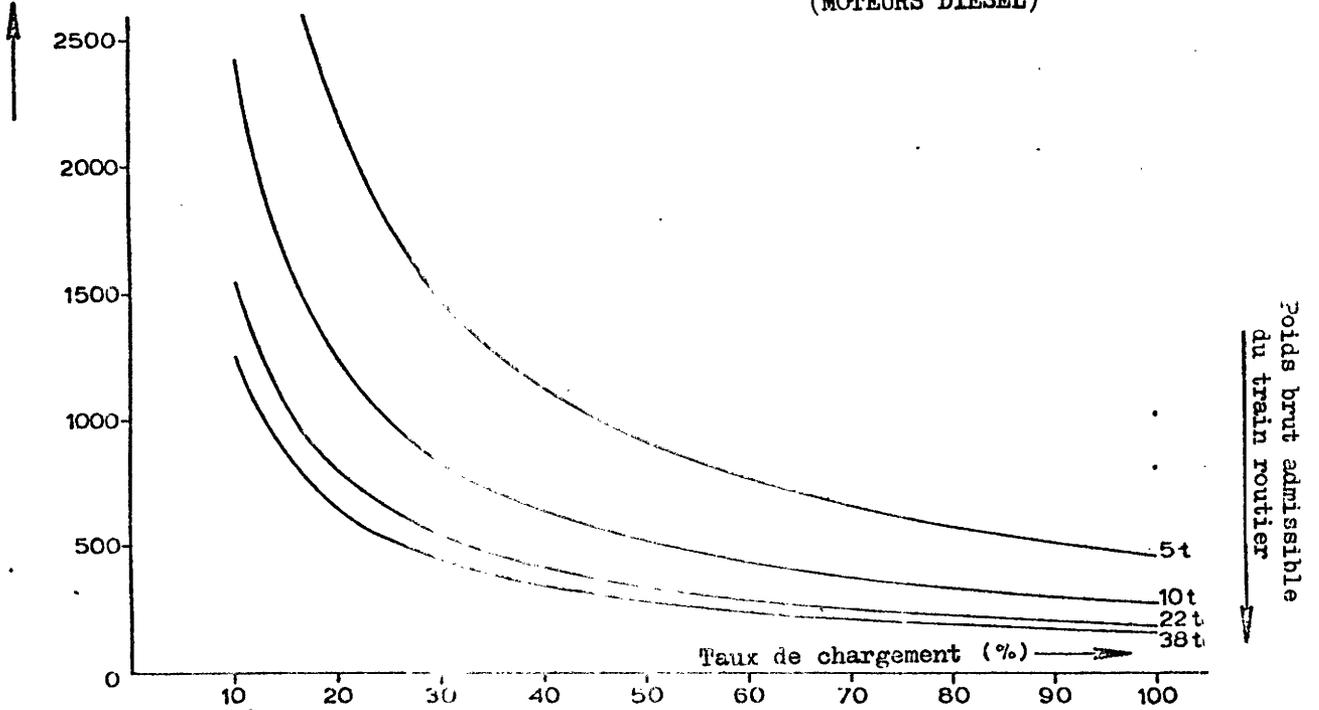


DIAGRAMME 27 CONSOMMATION D'ENERGIE EN FONCTION DU TAUX DE CHARGEMENT

Consommation d'énergie
(kcal/tkm)

POIDS LOURDS
(MOTEURS DIESEL)

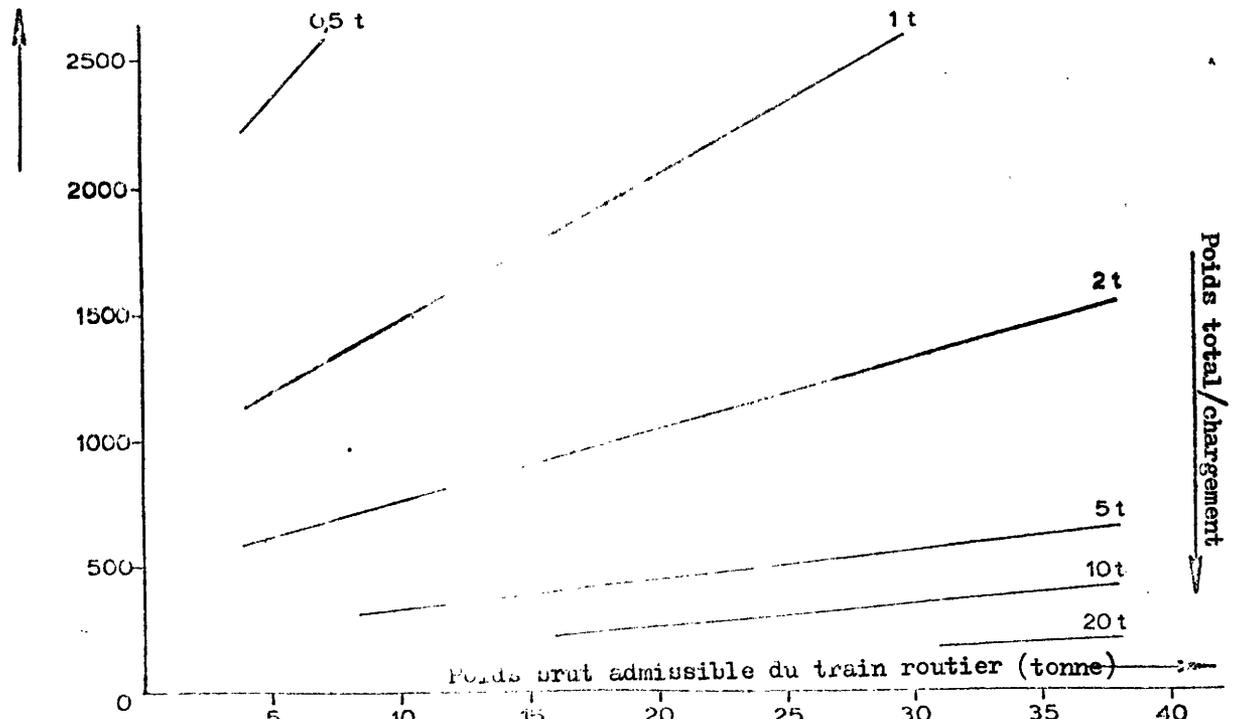


DIAGRAMME 28 CONSOMMATION D'ENERGIE POUR UN TONNAGE DONNE DE CHARGEMENT, EXPRIMEE EN FONCTION DU POIDS ADMISSIBLE DU TRAIN ROUTIER

C. Nouveaux moyens de transport

1. Généralités

Dans presque tous les pays industrialisés, le secteur des transports fait l'objet de développements considérables. Les modifications technologiques ininterrompues dont ce secteur fait l'objet apportent des avantages certains mais aussi de nouveaux inconvénients; par ex. les problèmes liés à la planologie (occupation du territoire) et la contribution du secteur des transports à la charge de l'environnement retiennent de plus en plus l'attention des pouvoirs publics.

On s'efforce, par des procédures multiples de réduire les aspects défavorables de ce progrès. Les mesures prises à cet effet peuvent être classées de la manière suivante:

- a) augmenter la productivité des systèmes de transport existants par l'amélioration du taux d'occupation et par une normalisation de l'écoulement du trafic
- b) promouvoir l'expansion de la capacité des systèmes actuels en construisant de nouvelles voies de communication (routes, voies ferrées)
- c) favoriser le développement de nouveaux systèmes de transport.

Depuis la crise pétrolière, on fait preuve d'un intérêt accru envers les répercussions que peuvent avoir chacune de ces mesures sur la consommation d'énergie. Le présent chapitre ne traitera que du thème mentionné au point c, à savoir les nouveaux systèmes de transport.

Il sera impossible d'établir une différence nette entre les systèmes destinés au transport de voyageurs et ceux qui sont réservés au transport de marchandises; nous maintiendrons néanmoins la répartition: systèmes de transport urbains et systèmes interurbains.

En ce qui concerne la dernière catégorie, divers systèmes de transport sur rail en cours de développement feront l'objet d'une attention particulière.

2. Transport urbain (y compris la banlieue)

a. Généralités

Dans ce secteur, les développements technologiques peuvent faire l'objet de diverses classifications. Une classification très pratique pour le planning est celle qui est basée sur la superficie du secteur pour lequel le système de transport convient le mieux. On peut encore utiliser une classification plus technique ayant pour base l'infrastructure secondaire nécessaire à ce système (degré de mobilité). La première classification (d'après la superficie du secteur à desservir), part du principe que les besoins en moyens de transport peuvent varier considérablement dans différentes zones urbaines. On distingue trois groupes de systèmes avec les secteurs correspondants desservis par ces systèmes:

- les systèmes de circulation destinés à un secteur de 1-2 km au plus, caractérisés par des mouvements de transport intensifs, quoique lents; vitesse moyenne de 3-5 km/h, capacité de pointe de 15.000-25.000 personnes par heure. Le "moyen de transport" type est actuellement la marche à pied. Chaque "city-center" d'une grande ville peut pour ainsi dire servir d'exemple à cet effet;
- les systèmes de distribution destinés à un secteur de 1-5 km, caractérisé par le trafic d'habitation-lieu de travail, avec une vitesse moyenne de 10-15 km/h et une capacité de pointe de 5.000-10.000 personnes par heure. Les moyens de transport types sont actuellement l'autobus urbain, le tram urbain et même quelque fois la bicyclette (le vélomoteur);
- le système "Rapid-Transit" destiné à desservir un secteur urbain de 3-20 km, est caractérisé par le transport des passagers dans les principales voies de passage; la vitesse moyenne étant de 30-80 km/h et la capacité de pointe 30.000-40.000 personnes par heure. Le moyen de transport type de ce système est le train urbain (en surface ou souterrain).

On peut déjà citer des dizaines de développements dans chacune de ces catégories mais les informations sur leur consommation d'énergie ne sont pas encore fiables pour le moment. La seconde classification, pour les nouveaux systèmes de transport urbain, suivant l'infrastructure nécessaire, permet de disposer de données plus sûres en ce qui concerne la consommation d'énergie.

En effet, les catégories peuvent être divisées d'après le degré de mobilité:

- libre choix de l'itinéraire, par ex.: automobiles urbaines électriques, autobus à la demande, etc.;
- systèmes de transport guidés sur voie par ex. trottoirs roulants, guidage automatique, coussin d'air et coussin magnétique;
- systèmes bi-mode où les véhicules sont en partie non guidés et en partie guidés sur voie.

La grande majorité des développements technologiques ont lieu dans le secteur des systèmes guidés sur voie du fait, notamment que les systèmes à itinéraire libre doivent faire concurrence à l'auto particulière et qu'on prévoit par conséquent qu'ils seront très difficiles à introduire sur le marché. Les systèmes bi-mode sont encore très peu développés d'ailleurs et les données dont nous disposons au sujet de la consommation d'énergie pour des systèmes guidés sur voie ne sont guère fiables.

D'ailleurs, ces systèmes ont l'avantage que, l'augmentation de la congestion du trafic constituant en ce moment le problème majeur de la plupart des villes, ils fournissent la meilleure solution à cet égard. Les systèmes de circulation guidés sur voie sont réunis sous la rubrique de "transport continu", par exemple trottoirs roulants ou petites cabines fixées à une chaîne. Pour les systèmes de distribution guidés sur voie, on pense surtout au transport par cabine, minitrans et minimétram avec des cabines ^{de} respectivement 6-20 personnes et de 20-60 personnes. Ces cabines entièrement automatiques sont soit suspendues à leur propre structure soit placées sur cette structure qui a en principe la forme d'un viaduc.

Les systèmes guidés sur voie "Rapid Transit" sont représentés essentiellement par le "Personal Rapid Transit" (PRT) dont le projet prévoit de petites cabines de 2-4 personnes qui se déplacent automatiquement et sans arrêt sur un réseau étendu pour aboutir à un terminus donné. On envisage toutefois pour le moment de faire des essais à l'aide de cabines de grandes dimensions (pouvant contenir 6-20 personnes), étant donné que la commande de l'ensemble du système soulève encore des problèmes.

b. Aspects énergétiques

Nous avons déjà vu que, parmi les systèmes de transport urbains précités, des dizaines sont déjà au stade du développement. Vu le caractère expérimental des opérations, nous ne disposons pas encore de chiffres sûrs concernant les prestations de transport et la consommation d'énergie de ces systèmes. Les données du graphique sont basées sur des calculs empruntés à la littérature, aussi le diagramme 29 n'a-t-il qu'une valeur d'orientation.

Il est évident que les informations relatives au taux d'occupation de ces nouveaux systèmes sont très peu nombreuses. Le diagramme tient compte d'un taux d'occupation donné par rapport à la totalité des places assises et debout, ce qui correspond à la pratique des entreprises de transport public urbain (en Europe, du moins). Dans les systèmes de transport urbain actuellement utilisés, il y a 2 places debout pour une place assise.

Pour le minitram et le miniméto, le projet prévoit que le nombre des places debout sera de 50-100% du nombre des places assises. Le PRT ne dispose que de places assises. Pour permettre la comparaison, les chiffres les plus récents (1971) des moyens de transport actuels dans les deux plus grandes villes néerlandaises ont été indiqués sur le diagramme.

Sur ce diagramme, le rendement énergétique a été mentionné pour l'énergie primaire, c'est-à-dire qu'en cas de traction électrique, on a tenu compte du rendement de la centrale électrique, lequel a été fixé à 35%.

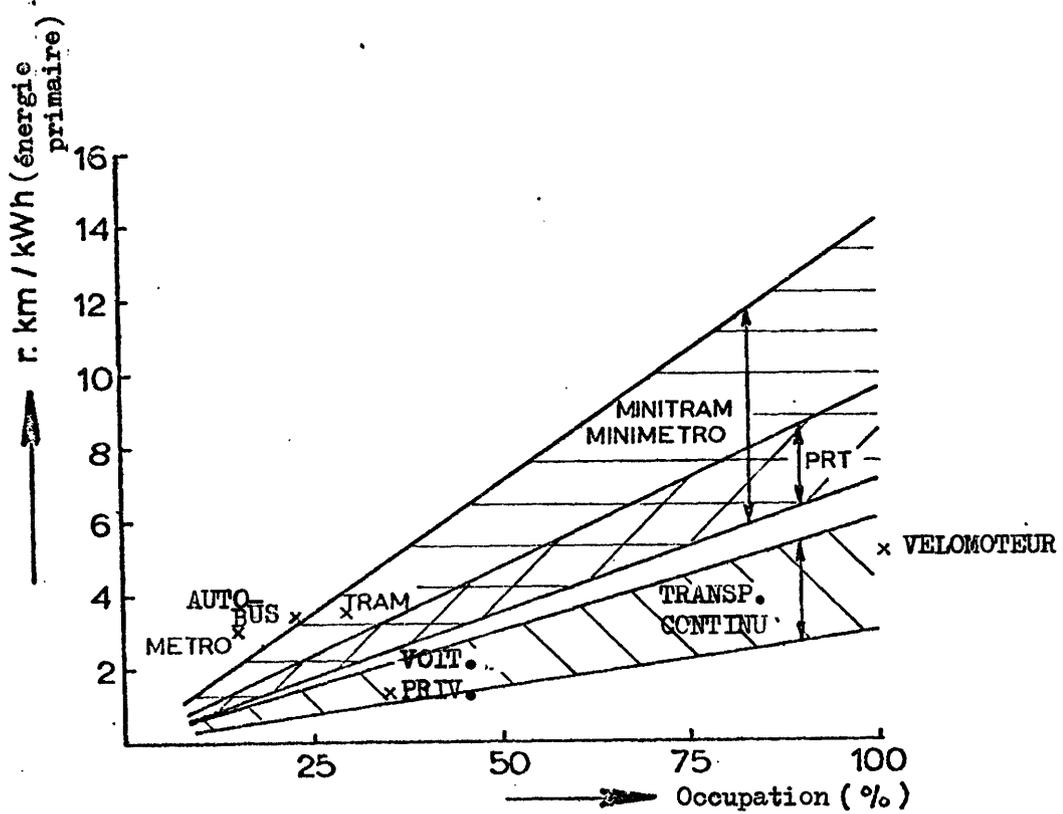


DIAGRAMME 29 CONSOMMATION D'ENERGIE PRIMAIRE DES SYSTEMES URBAINS

Référence : 15

La consommation d'énergie des nouveaux moyens de transport tels que minitram, miniméto, Personal Rapid Transit (PRT) et transport continu (par ex. trottoir roulant) n'est inférieure à celle des systèmes actuels qu'à condition que le taux d'occupation soit élevé.

L'augmentation du taux d'occupation des systèmes actuels peut entraîner elle aussi une réduction très sensible de la consommation d'énergie par voyageurs/km.

3. Transport interurbain

Dans presque tous les pays, les problèmes actuels posés par la circulation se situent principalement dans le domaine du transport urbain (congestion, charge imposée à l'environnement), aussi les responsables de la politique dans ce secteur concentrent-ils une grande partie de leurs efforts sur cette question.

On peut citer néanmoins un grand nombre de développements technologiques qui sont axés sur le transport interurbain. L'intérêt porté à ce secteur découle de la grande importance qu'on attache à la vitesse et à l'efficacité des communications interurbaines en tant que contribution au développement économique (tant national qu'international).

En outre, dans le secteur des transports, de nombreux systèmes technologiques peuvent être utilisés en principe pour les applications urbaines et interurbaines. **Cela est vrai, dans une très grande mesure, pour les systèmes guidés.**

Nous étudierons dans le présent paragraphe certains aspects des moyens de transport interurbains:

- aperçu général de certaines caractéristiques des développements déjà existants;
- données spécifiques concernant les principaux systèmes guidés;
- développement de trains rapides et de systèmes ultra-rapides;
- aspects énergétiques.

a) Aperçu général (tableau 11)

Comme pour les systèmes de transport urbains, la principale classification utilisée ici peut avoir pour base, elle aussi, l'infrastructure nécessaire (ou le degré d'autonomie): systèmes non guidés, systèmes guidés, système bi-mode.

Etant donné que l'objectif principal du développement de nouveaux systèmes de transport interurbains est d'accroître la vitesse de déplacement, on pense surtout au transport aérien pour la réalisation de systèmes interurbains "non guidés". On compte parmi ces systèmes l'ADAV (avion à décollage et atterrissage vertical), l'ADAC (avion à décollage et atterrissage court) et les avions supersoniques (SST-Concorde). Pour être complets, nous avons fait figurer ces systèmes dans notre aperçu, mais compte tenu du caractère très spéculatif des possibilités de ces systèmes en Europe, les informations à leur sujet seront brèves.

Comme pour les systèmes urbains, l'accent a été mis sur les systèmes guidés pour les transports interurbains. Il conviendra, ici aussi, de s'efforcer d'aboutir à une classification en fonction du type des nombreux systèmes qui sont au stade du développement ou des essais dans le monde entier.

La classification la plus importante est celle qui est basée sur la nature du système de sustentation:

- roues en acier sur rail en acier
- pneu en caoutchouc sur voie en béton
- coussin magnétique ou coussin d'air.

Compte tenu des grandes différences que présente la résistance du roulement ou le pouvoir de sustentation de chacun de ces types de support, l'effet exercé par un tel système sur la consommation d'énergie est considérable.

Outre le développement spécifique de systèmes de sustentation et de guidage, il existe aussi d'autres développements dans le domaine de nouveaux appareils de propulsion adaptés. En règle générale, les systèmes guidés sont équipés de moteurs diesel et de moteurs électriques de grandes dimensions.

Le manque de contact direct entre le véhicule et la voie, comme c'est le cas pour les systèmes à coussin magnétique et les systèmes à coussin d'air, oblige à recourir à des systèmes de propulsion spéciaux et notamment des électromoteurs linéaires, la propulsion par réaction ou par hélice.

Chaque système de propulsion nouveau possède à son tour de nouvelles caractéristiques énergétiques (voir littéra d).

Un troisième facteur ne tardera guère à jouer un rôle important dans ces développements, compte tenu des vitesses prévues (200 - 500 km/h), à savoir le profil aérodynamique. En effet, avec de telles vitesses, l'effet de la résistance de l'air sur la consommation d'énergie croît de façon exponentielle. Pour les systèmes combinés ou les systèmes bi-mode, il existe plusieurs autres possibilités, mais elles ont encore un caractère trop spéculatif pour le moment.

b) Données spécifiques des principaux systèmes interurbains (voir tableau 12)

Ce tableau donne un aperçu des caractéristiques (publiées en 1970 - 1972) des systèmes les plus connus actuellement. Le rendement énergétique y figure également, exprimé en "voyageur-mille par gallon de combustible pour la vitesse moyenne" (y compris par conséquent le ralentissement considérable dans les virages). Nous avons inséré le tableau 12 dans notre rapport de manière à pouvoir confronter divers systèmes (systèmes déjà existants et nouveaux systèmes) destinés au transport des personnes et des marchandises.

Afin de permettre la comparaison entre plusieurs études américaines partant de diverses hypothèses, nous avons maintenu dans ce tableau l'unité de rendement énergétique, à savoir le voyageur-mille par US gallon, ce qui confère essentiellement au tableau une valeur de comparaison.

c) Le développement de trains rapides et de systèmes guidés ultra-rapides

On prévoit que les systèmes de circulation et de transport du nord-est des USA, du Japon et de l'Europe de l'ouest ne tarderont guère à être insuffisants pour faire face à la demande sans cesse croissante de transport interurbains rapides. Différentes industries et institutions cherchent des solutions à ce problème. Trois possibilités font l'objet d'études : la première est d'augmenter la vitesse du réseau ferroviaire classique; un exemple nous est donné par le APT (Advanced Passenger Train) anglais et par le TGV des Chemins de fer français. On s'attend que ces deux trains soient mis en service en 1977-1978. Il existe bel et bien toutefois une limite d'ordre technique et économique à cette vitesse et elle se situe vraisemblablement à 300 km/h environ. C'est pourquoi, au début des années soixante, on a cherché d'autres possibilités de sustentation et de propulsion indépendantes de cette limite. Rentrant en ligne de compte à cet effet le système à coussin d'air et le système à coussin magnétique.

c.1) Trains rapides

Depuis qu'en 1964, les Japonais ont commencé à utiliser des vitesses de 200 km/h sur une base commerciale, avec leur ligne Tokaido, l'intérêt vers le développement de trains rapides sur des rails déjà existants ou adaptés à cet effet s'est accru dans le monde entier.

On trouvera au tableau 13 un aperçu de la situation en matière de développement de trains rapides.

La sustentation et le guidage de tous les trains rapides consiste en roues en acier sur des rails en acier. Les principales différences ont surtout été observées dans les systèmes de propulsion utilisés.

Les Français ont enregistré les premiers succès en employant la propulsion par turbine à gaz; d'autres pays appliquent maintenant ce procédé (l'Angleterre notamment). Des moteurs diesel de plus grandes dimensions sont mis au point surtout en Angleterre et au Canada; ils offrent des perspectives intéressantes sur le plan de la consommation d'énergie. Ce sont encore les moteurs électriques qui détiennent jusqu'ici les records de vitesse (365 km/h en France en 1955).

c.2) Systèmes guidés ultra-rapides

Il est évident que la vitesse des trains classiques ne peut pas être augmentée de façon illimitée. Au-dessus de 250-300 km/h, les problèmes techniques (stabilité et adhérence au rail par ex.) s'accroissent considérablement. En outre les frais d'entretien (et la consommation d'énergie - voir d) augmentent de façon très progressive avec la vitesse. La voie doit être adaptée aux vitesses accrues, ce qui nécessite souvent la construction de tracés entièrement nouveaux (voir tableau 12).

Sur des distances moyennes, entre 250 et 1000 km, les vitesses élevées sont souhaitables néanmoins. Différentes études font apparaître que, sur de telles distances, le trafic aérien est nettement désavantagé par la mauvaise organisation des services connexes (transport aéroport-ville, notamment). Sur de telles distances, de nouveaux débouchés pourraient s'ouvrir aux systèmes rail-roue/ultra-rapides; c'est ce qu'illustre le diagramme 30.

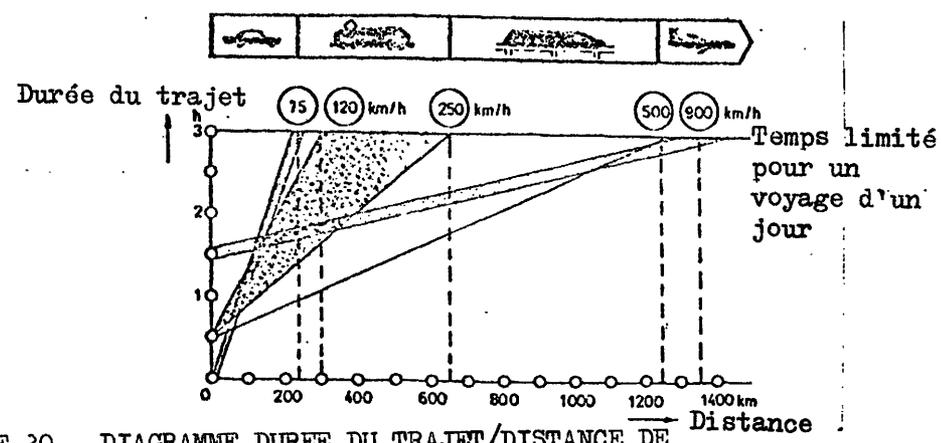


DIAGRAMME 30

DIAGRAMME DUREE DU TRAJET/DISTANCE DE DIVERS SYSTEMES DE TRANSPORT
Référence : 37

03-2-10004

Rentrent seules en ligne de compte les vitesses plus élevées, les systèmes à sustentation, à guidage et à propulsion sans contact. Deux versions technologiques différentes sont en voie de développement actuellement : le système à coussin d'air et le système à coussin magnétique.

La littérature américaine réunit néanmoins ces deux systèmes en un seul groupe, à savoir le TACV (Tracked Air Cushion Vehicles). Dans les systèmes à coussin d'air, on utilise l'impulsion du jet d'air qui s'échappe pour faire flotter le véhicule au-dessus de la voie sur une faible distance. Cette technique est un développement plus poussé du Hovercraft anglais. Une sustentation sans contact nécessite une commande également sans contact. Les Français ont appliqué à cet effet le turbopropulseur et le moteur à réaction (aérotrain, notamment) qui avaient déjà fait leurs preuves dans l'aviation.

Les Anglais ont mis au point un moteur linéaire spécial. Ce moteur est presque silencieux et ne possède aucune partie mobile, par contre la technique plus complexe et le faible rendement constituent des désavantages.

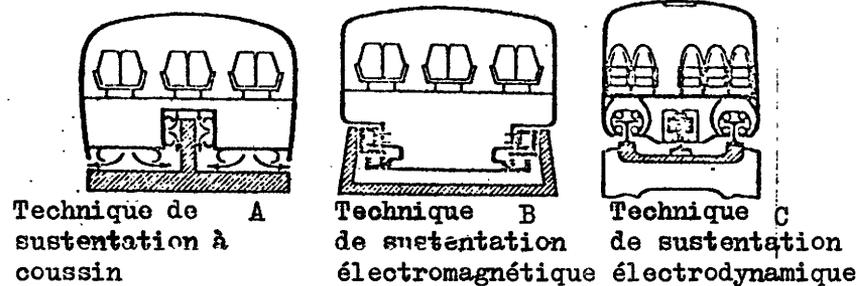
Les perspectives d'avenir des véhicules à coussin d'air ont paru attrayantes jusqu'à l'apparition du système à coussin magnétique.

La technique de ce dernier système est plus avancée (bien que moins développée pour le moment), mais les véhicules auxquels elle est appliquée ont le grand avantage de consommer moins d'énergie et d'être plus silencieux.

Elle a encore un autre avantage important sur le système à coussin d'air, à savoir de résoudre le problème de l'aiguillage dans le système dit à sustentation électromagnétique.

L'aiguillage est un élément indispensable du réseau. L'entrefer plus large utilisé pour le système à coussin d'air pose, lors de l'application du système de propulsion le plus employé, c'est-à-dire le moteur linéaire (LIM), de nombreux problèmes qui n'existent pas dans le cas de la suspension magnétique (entrefer moins large).

On distingue deux technologies différentes dans le cas de la sustentation magnétique :



A = coussin d'air B = électromagnétique C = électrodynamique

DIAGRAMME 31 DIVERS SYSTEMES DE SUSTENTATION A COUSSIN

Référence : 37

- le système à sustentation électrodynamique (EDS) est basé sur l'effet de répulsion de champs magnétiques engendrés par de puissants électro-aimants pourvus de superconducteurs. Ce système est caractérisé par une hauteur en sustentation relativement élevée; il est en voie de développement chez Siemens en Allemagne et aussi au Japon.
- le système à sustentation électromagnétique (EMS) fonctionne à l'aide d'électro-aimants réglés placés dans le véhicule qui attirent des rails de réaction incorporés dans la voie. A l'aide d'un système de réglage, on peut maintenir une faible hauteur en sustentation (entrefer) sans aucun contact. Ce système est surtout mis au point en Allemagne et notamment par MBB et par Krauss-Maffei (Transrapid, Transurban).

Aux Etats-Unis, où les travaux de développement sur les systèmes à coussin d'air ont été plus nombreux (Hovertrain, notamment), la firme ITV effectue actuellement des essais sur un système qui combine le coussin magnétique et le coussin d'air.

Ce système dont le principal intérêt est de permettre la réalisation d'économies d'énergie, est basé sur un guidage électromagnétique et sur un coussin d'air pour le système de sustentation.

Il importe de souligner qu'aucun de ces systèmes n'a encore franchi le stade du prototype sur la voie d'essai.

Les experts indépendants insistent surtout sur les nombreux problèmes techniques encore irrésolus qui se présentent lorsqu'on augmente la vitesse (de 300 km/h à 500 km/h).

Il existe encore, en tout cas en Europe de l'ouest, un grand nombre de problèmes non techniques qui doivent être étudiés avant que les systèmes de transport ultra-rapides puissent devenir opérationnels.

d) Aspects énergétiques

Les problèmes techniques qui se présentent lorsqu'on augmente les vitesses ordinairement appliquées à l'heure actuelle (de 300 km/h à 500 km/h) se situent dans le domaine de la technique de la propulsion et de l'aérodynamique, lesquelles ont une influence prépondérante sur la consommation d'énergie.

C'est ainsi que la résistance de l'air qui augmente en fonction du carré de la vitesse, est un facteur limitatif de l'augmentation de la vitesse pour tous les systèmes de transport. Afin d'annihiler l'effet de cette résistance, il faut utiliser des quantités d'énergie sans cesse croissantes : par conséquent, un train rapide qui consomme 4000 kW/h lorsque sa vitesse est de 300 km/h, en consommera 10.000 à 400 km et même 20.000 si la vitesse est de 500 km/h.

Il importe donc également, du point de vue énergétique, de faire une comparaison entre les puissances nécessaires à un système à sustentation d'une part, et celles qui sont requises par un système de guidage, d'autre part. On constate de grandes différences entre les systèmes destinés à être concurrentiels dans l'avenir : trains rapides et systèmes à coussin d'air ou à coussin magnétique.

Sur la base d'expériences effectuées en France, on a pu conclure qu'un train rapide roulant à 300 km/h consommait plus de 1 kW/a par tonne, alors qu'un système à coussin électromagnétique employait

4-5 kWh par tonne et un système à coussin magnétique électrodynamique de 15 à 45 kWh par tonne, les systèmes à coussin d'air consommant 20 kWh/t (à grande vitesse) et 5-7 kWh/t dans les villes (vitesse peu élevée).

Nous avons déjà étudié, au paragraphe c.1, le développement de systèmes de propulsion plus grands (par ex. turbine à gaz, moteurs diesel et moteurs électriques) destinés aux trains rapides. Au paragraphe c.2, nous avons souligné la nécessité d'utiliser une propulsion sans contact pour la sustentation sans contact des systèmes à coussin. Si les français ont surtout construit des systèmes à turbopropulsion et des systèmes de propulsion par réaction, par contre les anglais et les allemands utilisent le moteur linéaire (LIM) qui convient surtout aux suspensions électromagnétiques.

En ce qui concerne la consommation d'énergie, le LIM est loin d'avoir les mêmes avantages que le moteur électrique classique.

C'est pour résoudre ces problèmes qu'on développe notamment des moteurs linéaires synchrones.

Le principal problème qu'il pose l'augmentation de la vitesse (de 300 km/h à 500 km/h) est que cette augmentation nécessite des installations de propulsion de plus en plus grandes et dont le poids représente parfois 60 - 70 % du poids total du véhicule !

En prenant tous ces facteurs en considération, on peut admettre que les données opérationnelles de tous ces nouveaux systèmes ont encore un caractère très spéculatif. Les données dont nous disposons ont été réunies au tableau 13.

En ce qui concerne la consommation d'énergie nous connaissons très mal les caractéristiques des projets des fabricants.

Dans certains cas, les fabricants ne font état - incidemment d'ailleurs - que de la participation de l'énergie aux dépenses d'exploitation et, dans d'autres cas, il est question de la composante énergétique en kWh installé par tonne de poids brut.

Ces données chiffrées n'ont donc qu'une valeur indicative pour celui qui entend comparer des consommations effectives.

Afin d'illustrer l'aspect énergétique des principaux systèmes mentionnés dans le présent rapport, le tableau 14 contient quelques données schématiques sur les vitesses, le poids total, la charge utile et le kWh investi par tonne de poids brut.

On trouvera au diagramme 32 un résumé du rendement énergétique des systèmes interurbains déjà existants et des nouveaux systèmes.

limites de vitesse (km/h)	guidage	système de sustentation	propulsion	Avantages	Inconvénients	Consommation d'énergie
<u>Systèmes autonomes</u>						
Avions ADAC	-	-	turbopropulsion	peut atterrir à proximité des villes	m nuisance sonore dans les villes	grandes quantités
Avions ADAV	-	-	turbopropulsion	peut atterrir ds les villes	m nuisance sonore dans les villes	très gr. quant.
<u>Avions supersoniques</u>						
<u>Systèmes guidés</u>						
Systèmes sur rail	voie ferrée classique ou adaptée, pneus caoutchouc tracés sur viaducs	roues acier ou pneus caoutchouc sur rails acier	moteurs à réaction	déplacement très rapide	m nuisance sonore pollution de la stratosphère	très grandes quantités
240-350	voie ferrée classique ou adaptée, pneus caoutchouc tracés sur viaducs	roues acier ou pneus caoutchouc sur rails acier	1) électromoteurs : linéaires ou à piston rotatif 2) turbines à gaz	1) technologie classique développée 2) faibles quantités d'énergie nécessaires pour le guidage	1) entretien de la voie très coûteux 2) choc thermodynamique, d'où nécessité de vastes tracés 3) le monorail pose des problèmes d'aiguillage	faibles quantités
240-500	surfaces en béton horizontales comme surfaces portantes guidage vertical par poutres en T ou en U	coussins d'air entre le véhicule et la voie au moyen de compresseurs ou d'électro-auxiliaires	1) électromoteurs linéaires avec rail à réaction dans la voie de guidage 2) hélices entraînées à l'aide de turbines à gaz 3) électromoteurs à piston rotatif	1) allure régulière 2) permet de multiples systèmes de propulsion	1) problèmes d'aiguillage 2) les coussins d'air provoquent des nuisances sonores 3) les quantités d'énergie nécessaires au coussin d'air sont considérables pour les grandes vitesses 4) coûteux	grandes quantités
<u>Systèmes à tubes</u>						
240-800	tubes en béton ou en acier, à la surface ou souterrains	1) roues sur rails 2) coussins d'air 3) coussins magnétiques	1) électromoteurs 2) tubes pneumatiques	1) systèmes aérodynamiques attrayants 2) permettent de très grandes vitesses 3) permettent de limiter la nuisance sonore	1) tunnels souterrains coûteux 2) facteurs technologiques encore incertains 3) les champs magnétiques constituent un danger pour les passagers	moymme
<u>Systèmes bi-mode</u>						
<u>Systèmes automatiques sur route</u>						
100-150	autoroute normale à système de guidage incorporé	identique à celui des autos utilisées actuellement	1) moteur à combustion intérieure ou extérieure 2) électromoteur	1) augmentation de la sécurité et du taux d'occupation sur les autoroutes 2) libre choix de la dest. 3) terminal pas nécessaire	1) l'entretien du véhicule est trop compliqué pour le propriétaire 2) système complexe nécessaire pour le raccord des véhicules 3) coûteux	faibles quantités
150-240	voie ferrée normale	roues en acier sur rails en acier	1) moteur électrique rotatif 2) diesel 3) turbines à gaz	1) allègement de l'occupation des autoroutes 2) libre choix de la destination	sur le plan commercial, ne se justifient que sur les longues distances	très faibles quantités

Tableau 11 - Nouveaux moyens de transport - Aperçu

Systèmes guidés	pays	vitesses (km max./moy.	nombre de places assisées	poids total (tonnes)	nombre de véhicules du "train"	puissance en kW		taux d'occu- pation	rendement énergétique en voyageurs/ mile par gallon (*)
						total nécessaire à la sus- tentation	par tonne en vitesse de croisière		
<u>Trains rapides</u> Turbotrain TGV-001 Train Tokaido Train JR ultra rapide	Fr	300/260	200	225	6	3000	13	60 %	60
	Jap.	230/200	480	390	6	3000	8	60 %	100
	USA	320/200	360	200	3	3000	14	60 %	100
	USA RFA	400/360 500/400	120 120	60 70	1 1	6000 7500	100 107	60 % 60 %	24 23
<u>Systèmes à coussin d'air</u> Hovertrain Maglev	USA	270-550/ 200-320	80/80	40/50	1	7500/ 6000	190/120	60 %	12/19
	USA	650/400	120	70	1	6700	95	60 %	31
	USA	2800/2400	250	375	1	170.000	500	60 %	11
<u>Systèmes bi-mode</u> Système électronique sur autoroute (deux autobus) Train-auto pour voyageurs	USA	240/160	120	40	2	600	15	60 %	125
	USA	240/150	prévisions pour 1990-2000, pas de données						

Chiffres comparatifs pour le rendement énergétique : systèmes actuels (en voyageurs/mile par gallon) :
avion 15-20; autobus interurbains 83; auto interurbains 35; train de voyageurs 65

(*) 1 voyageur/mile par gallon = 0,04 voyageur/km par kWh

Tableau 12 - Diverses données concernant les nouveaux systèmes de transport interurbains

Référence : 8

Pays	Train	Propulsion/ transmission	Vitesse km/h		Année d'introduction prototypé	Année d'introduction application commerciale	La voie doit-elle être adaptée ?
			projet	résultat des essais			
France	TGV 001	Turbo/électrique	300	318	1972	(1978)	voie nouvelle
Japon	Séries 951/961	Electrique	260	286	1970	1974	voie nouvelle
USA	Metroliners	Electrique	257	---	1968	1969	voie améliorée
USA/Canada	UAC Turbo	Turbo	257	---	1969	1968	voie améliorée
Royaume-Uni	APT	Turbo/électrique	250	100	1972	(1978)	voie utilisé actuel.
Italie	ETR-Fiat	Electrique	250	---	1972	1975	voie améliorée
Japon	Tokaido	Electrique	210	257	1962	1964	voie nouvelle
France	RTG	Turbo/hydraulique	200	224	1972	1973	quelques modifications
Royaume-Uni	HST	Diesel/électrique	200	230	1972	1975	voie utilisée actuel.
RFA	ET 403	Electrique	200	---	1973	1975	voie améliorée
URSS	ER 200	Electrique	200	---	?	?	voie utilisé actuel.
Canada	IRC	Diesel/électrique	190	---	1971/3	?	voie utilisé actuel.

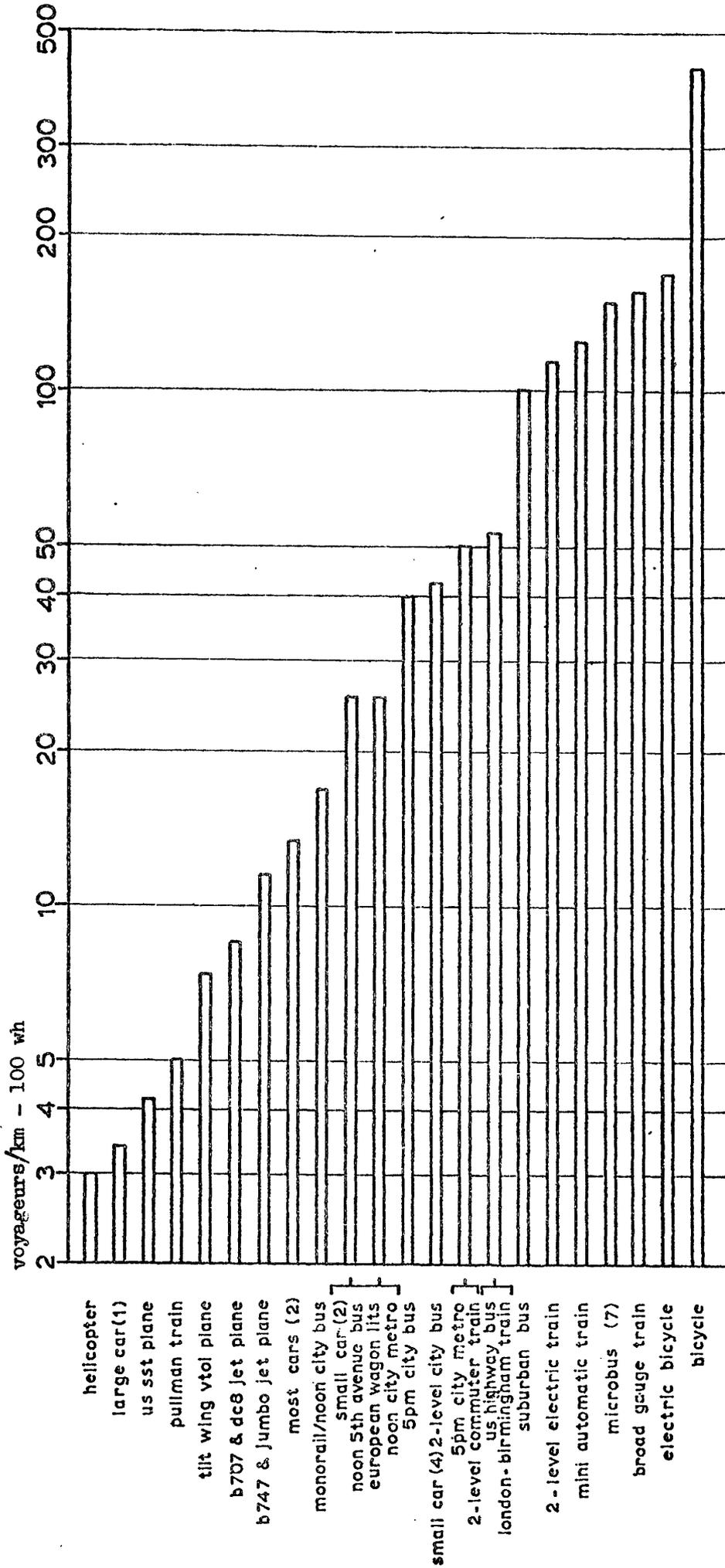
Tableau 13 - Systèmes de trains rapides en développement

Référence : 38

	vitesse maximale (km/h)	poids total (tonnes)	charge utile en % du poids total	puissance installée (kW par tonne brute)
<u>Systèmes actuels</u>				
camion	80-120	3,5-38	35-60 %	6-20
autobus	60-100	10-18	20-30 %	12-20
métro	60-80	60	30 %	7-10
train de marchandises	80-100	jusqu'à 2000	30-40 %	< 1
train de voyageurs	80-120	250-500	4 à 8 %	4-9
avion (DC-8 ; B-747)	845-925	140-320	9 à 11%	130-150
<u>Trains rapides européens</u>				
HSB (RFA)	300-450	3000	42 %	30
turbo TGV (France)	260-300	225	6 %	10-26
APT (Royaume-Uni)	250-400	150	5 %	10-20
HST (Royaume-Uni)	200-230	250	5 %	8-15
<u>Coussin d'air TACV</u>				
transrapid (RFA)	400-500	10-20	20 %	85 (prototypes)
aerotrain (France)	400-500	20	30 %	95
hovertrain (Royaume-Uni)	400-500	25	30 %	140

Tableau 14 - Comparaison entre la puissance installée de divers systèmes de transport actuels et futurs

Référence : 9 et 37



nombre entre parenthèses = occupants

DIAGRAMME 32 RENDEMENT ENERGETIQUE DE DIVERS SYSTEMES DE TRANSPORT DE PERSONNES DEJA EXISTANTS/NOUVEAUX

REFERENCE : 10

D. Comparaison des diverses sources d'énergie

Les sources d'énergie les plus importantes utilisées actuellement pour les moyens de transport sont les produits dérivés du pétrole brut; le charbon et le gaz naturel sont également employés dans de faibles proportions. Il est nécessaire que l'énergie dépende dans une moins grande mesure de l'huile minérale, en partie parce que la CEE est tributaire des importations et en partie parce que les réserves de pétrole ne sont pas inépuisables. D'après les experts, une reconversion radicale ne peut être réalisée en une seule décennie.

Pour les 25 années prochaines, on prévoit que :

1. les économies d'énergie seront poursuivies;
2. la chimie du gaz naturel et la carbochimie seront stimulées.

Des économies peuvent être réalisées lorsque le consommateur d'énergie fait un usage judicieux de cette dernière en ayant recours à, par exemple, des moteurs de rendement supérieur et de puissance plus faible dans lesquels le producteur utilise du gaz brûlé à la torchère. Le gaz naturel et le charbon peuvent être transformés suivant un procédé connu du point de vue technologique et justifiable au plan économique, en combustibles liquides et gazeux dont l'emploi est relativement facile : méthanol, benzol, et essence synthétique, par exemple.

A long terme, l'énergie nucléaire et l'énergie solaire doivent pouvoir être exploitées d'une manière rentable. Citons à titre d'exemple :
énergie nucléaire \longrightarrow électricité \longrightarrow H₂.

La technologie des moyens de transport n'est pas encore parvenue à un stade qui permette l'utilisation rentable de formes d'énergie telles que H₂ et les accumulateurs.

Le tableau 15 compare les différentes sources d'énergie : celles qui sont utilisées actuellement au transport sur route et aussi les sources d'énergie futures potentielles.

Il convient de souligner qu'un grand nombre des valeurs reprises dans le tableau sont les résultats d'estimations effectuées par deux experts de TNO. Ce sont des valeurs qui ne figurent pas dans la littérature sous une forme directement utilisable mais dont il importe de donner une information globale.

Dans le tableau, seuls le moteur Otto et le moteur Diesel sont mentionnés en tant que transformateurs de l'énergie chimique fournie par les combustibles, en énergie mécanique.

Le moteur Wankel (à pistons rotatifs) doit être considéré comme un moteur Otto avec la différence toutefois que le rendement est inférieur au rendement du moteur à gaz aspiré classique. En outre, les qualités des émissions sont moins favorables.

Or, vu qu'un moteur Wankel est très compact, il est possible d'installer, autour de celui-ci, des installations d'épuration des gaz d'échappement de grandes dimensions, par exemple des post-brûleurs thermiques et catalytiques.

La turbine à gaz, le moteur à cycle Rankine et le moteur Stirling sont tous à combustion dite extérieure, aussi tous les combustibles cités peuvent-ils être utilisés. En outre, le rendement des divers combustibles est sensiblement le même, mais les types de moteur que nous avons mentionnés n'ont pas tous le même rendement. La turbine à gaz et le moteur à cycle Rankine ont un faible rendement ($\sim 15\%$), le moteur Stirling un rendement élevé (25%).

Lorsque le taux de production est considérable, le prix de revient de ces moteurs est environ 1,5 fois plus élevé que celui des moteurs Diesel. Les qualités des émissions sont très favorables par rapport à l'utilisation d'essence dans un moteur Otto (environ 70 % de moins). On entend par "qualités des émissions" (expression qui figure dans une colonne du tableau 15) la pollution de l'environnement provoquée par les gaz d'échappement et l'évaporation du carburant contenu dans le réservoir et dans le carburateur, le taux d'émission d'un système normal alimenté à l'essence étant fixé à 100. La colonne "sécurité" évalue le système de carburation du véhicule, compte tenu en particulier des risques d'explosion et de la toxicité du carburant. Les autres colonnes du tableau n'appellent pas de commentaires.

Tableau 15 - Comparaison entre diverses sources d'énergie

Caractéristiques Source d'énergie	Valeur calorifique kcal/kg	Poids spécifique kg/l	Valeur calorifique par l. kcal/l	Type de moteur approprié	Rendement total en %	Qualités des conditions par rapport à l'essence dans un moteur Otto : indice 100	Sécurité par rapport à l'essence dans un moteur Otto : (100 = sécurité absolue)	Prix de revient du combustible dérivé du pétrole	Coût du stockage et de distribution par rapport à l'essence - indice = 100	Stockage dans les autos, par rapport à l'utilisation d'essence	Investissements dans le système du moteur et du combustible par rapport à un moteur à essence - indice 100	Matériaux premiers et leur disponibilité	Remarques
Essence	10200	0,76	7752	Moteur Otto	~ 18	100	100	100	100	Réservoir sous pression atmos.	100	Pétrole brut, rare dans l'avenir	
Diesel-oil	10200	0,83	8466	Moteur Diesel	~ 24	65	25	100	85	Réservoir sous pression atmos.	200	Pétrole brut, rare dans l'avenir	Traffic poids lourds (Miss. 90 et CH plus faibles moteurs); émission de suie; dans un moteur lourd et court.
l.p.g. (liquéfié sous pression)	11000	0,54	5940	Moteur Otto	~ 20	90	~ 100	100	~ 200	Réservoir sous pression de 10 atm. lourd	~ 125	Pétrole brut, rare dans l'avenir	Aux Pays-Bas, 2 % du parc automobile - Légère transformation du moteur à essence
Méthanol (méthyl. fuel)	4700	0,80	3760	Moteur Otto	~ 20	80	85	130	150	Réservoir sous pression atmos.	110	Pétrole brut, rare dans l'avenir	Tous les combustibles bois + déchets, dans un moteur.
Ethanol	6400	0,80	5120	Moteur Otto	~ 19	90	90	~ 250	130	Réservoir sous pression atmos.	105	Pétrole brut, rare dans l'avenir	Produits agricoles
Acétones	6500	0,79	5420	Moteur Otto	~ 19	~ 100	50	~ 200	130	Réservoir sous pression atmos.	105	Pétrole brut, rare dans l'avenir	Peu de données disponibles en tant que combustible pour moteur
Ammoniac (liquéfié sous pression)	4400	0,81	3600	Moteur Otto	~ 20	~ 50	~ 100	~ 300	~ 250	Réservoir sous pression de 10 atm. lourd	~ 150	H ₂ : pas de pénurie	Peu de données disponibles en tant que combustible pour moteur
Gaz naturel (liquéfié à -170°C)	11950	0,42	5019	Moteur Otto	~ 22	40	~ 100	~ 75	~ 350	Réservoir cryogène sous pression de 10 atm. lourd	150	Sources de gaz naturel : pénurie dans un avenir lointain	Peu de données disponibles en tant que combustible pour moteur; toxique, problèmes de corrosion
Hydrogène (liquéfié à -240°C)	2650	0,07	2005	Moteur Otto	~ 15	40	~ 150 (plus élev. pendant la période de démarrage.)	~ 250	~ 1000	Réservoir cryogène sous pression de 10 atm.	Moteur Otto ~ 200 Moteur Diesel ~ 300	Stocks expérimental	
Hydrogène sous forme d'hydrures métalliques	2400	1,75	4200	Moteur Otto	~ 15	40	~ 150 (plus élev. pendant la période de démarrage.)	~ 150	~ 1000	Réservoir sous pression de 4 atm. contre un hydrure métallique, volum. sous : très lourds, très vol.	Mot. Otto ~ 200 Mot. Diesel ~ 300	Métaux rares nécessaires au stockage	Technique encore au stade initial
Electricité stockée dans des acides (batteries plom.-acide)	20	2	40	Electro-moteurs	~ 15	~ 15 (y compris le contr. élect.)	25	~ 250	~ 25		~ 400	Energie multi-usage pas de pénurie	Stade expérimental : les acides ou les cellules à combustible doivent encore être améliorés dans une très grande mesure

Combustibles de remplacement

Commentaires relatifs à l'étude sur modèle

Les résultats mentionnés sur les diagrammes 7, 8, 10, 11, 17, 33, 34 et 35 ont été fournis par une étude sur modèle. La base de cette étude était un parc automobile ^{moyen} composé d'après les données d'une étude statistique. La répartition sur le poids du véhicule est indiquée aux diagrammes 36 et 37. Cette répartition théorique correspond bien à la répartition pratique, dans le domaine de poids 500-1100 kg. En outre, la répartition réelle s'écarte de la répartition normale du fait que le type de voiture automobile qui pèse plus de 1100 kg est souvent également beaucoup plus lourde.

La courbe réelle a tendance à être plus linéaire dans le domaine de poids 1100 - 1500/1600 kg. C'est pourquoi nous avons fait figurer en plus de la catégorie de 1200 kg, la catégorie de 1500 kg.

Les diagrammes 38 à 41 inclus indiquent que certains paramètres varient en fonction de la catégorie de poids, la moyenne et l'écart étant mentionnés à chaque fois. Ces paramètres sont le produit du coefficient de résistance de l'air par la surface frontale (diagramme 38), la charge maximale admissible (diagramme 39), la puissance du moteur (diagramme 40), la cylindrée unitaire ou la cylindrée du moteur (diagramme 41). A l'aide de ces variables d'entrée, un ordinateur a calculé la consommation de combustibles du parc automobile défini ci-dessus.

Pour des vitesses variables, la consommation a été calculée pour plusieurs cycles de conduite, c'est ce qu'illustre le diagramme 42. Pour chaque cycle, la valeur de la vitesse constante et de la vitesse moyenne (y compris l'arrêt) ont été indiquées. Les cycles 1 à 5 inclus ont été obtenus à l'aide d'une analyse du trafic urbain à Cologne. Le cycle ECE est le "cycle européen" pour le contrôle des gaz d'échappement.

Le cycle 7 a été ajouté à l'ensemble afin d'essayer d'englober dans l'analyse le trafic interurbain (autoroutes exceptées). Le cycle 6 est une version abrégée et surtout plus lente du cycle 7 qui pourrait être considéré comme représentant les régions interurbaines très peuplées où la vitesse est limitée. Toutefois, ce cycle a surtout été mentionné pour servir de contrôle. Sa vitesse moyenne est sensiblement égale à celle du cycle 5. D'ailleurs, la consommation calculée pour les cycles 5 et 6 est pour ainsi dire la même, aussi semble-t-il justifié d'introduire le cycle 7 dans la série 1 à 5 inclus.

Lorsque les diagrammes 8, 17, 33, 34 et 35 indiquent "trafic urbain" on entend par là le cycle ECE, alors que l'expression "route libre" concerne les résultats du cycle 5. Enfin, nous avons essayé de calculer la consommation sur les autoroutes en introduisant des variations de vitesse de 80 et de 120 km/h, avec des accélérations et des ralentissements de $0,25 \text{ m/sec}^2$. La consommation qui en a résulté était néanmoins identique à la consommation pour une vitesse constante de 100 km/h.

Les diagrammes 33, 34 et 35 demandent encore un supplément d'informations. Le diagramme 33 représente la relation entre la consommation d'énergie et les modifications intervenues dans la résistance au roulement, par optimisation des pneus et du revêtement de la route; toutefois l'effet exercé est minime. Le diagramme 34 indique d'une part la consommation d'énergie et d'autre part le produit du coefficient de résistance de l'air C_w et la surface frontale F. Ce diagramme permet d'avoir une idée approximative de l'effet exercé sur la consommation d'énergie par les paramètres aérodynamiques et dimensionnels. Dans le trafic urbain, cet effet est négligeable, il est relativement faible sur les routes libres. Le diagramme 35 fait apparaître l'effet de la cylindrée du moteur, pour un poids déterminé du véhicule, sur la consommation d'énergie. Dans le trafic urbain, cet effet peut déjà représenter une augmentation de 10 % lorsque la cylindrée passe de 1300 à 1600 cc.

Toutefois, cet effet est peu marqué sur les routes libres.
Comme nous l'avons indiqué, les diagrammes 7 et 8 ont été établis
sur la base de cette étude sur modèle.

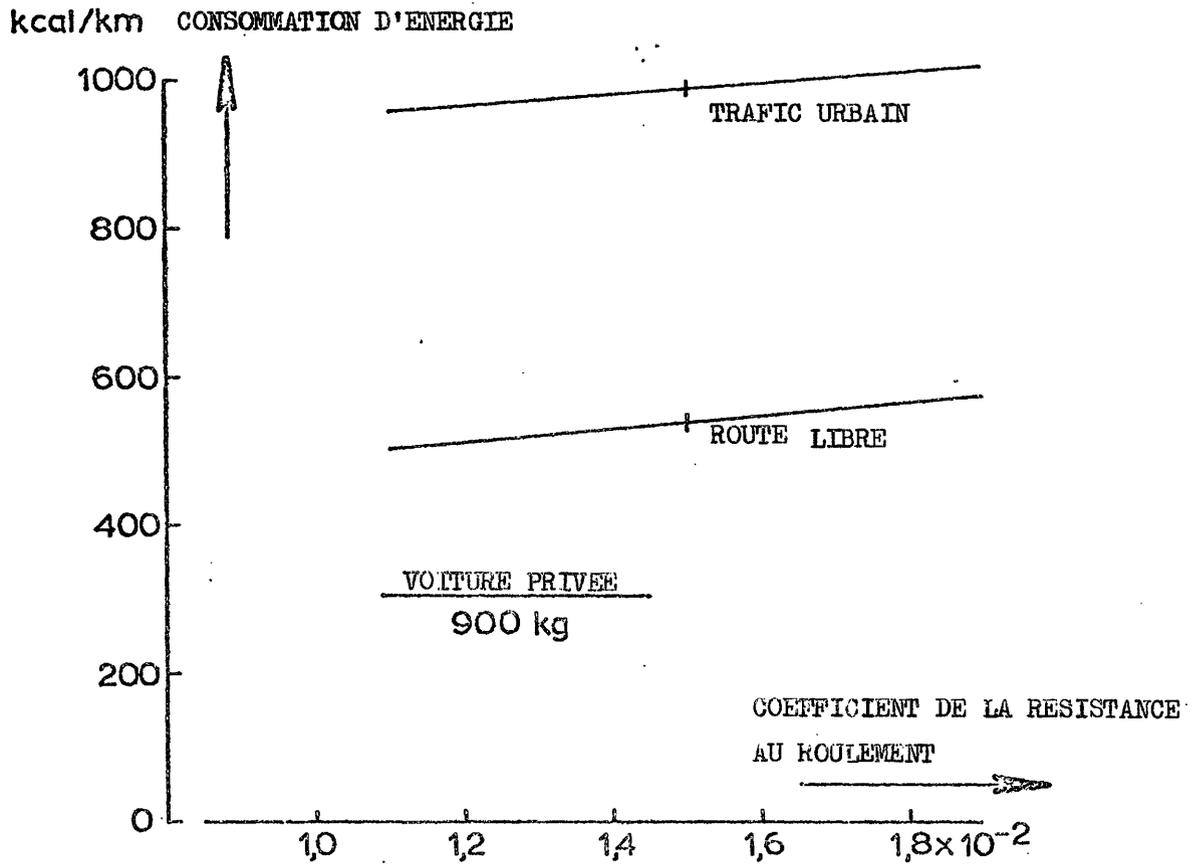


DIAGRAMME 33 EFFET, DES MODIFICATIONS INTERVENUES DANS LA RESISTANCE, SUR LA CONSOMMATION D'ENERGIE

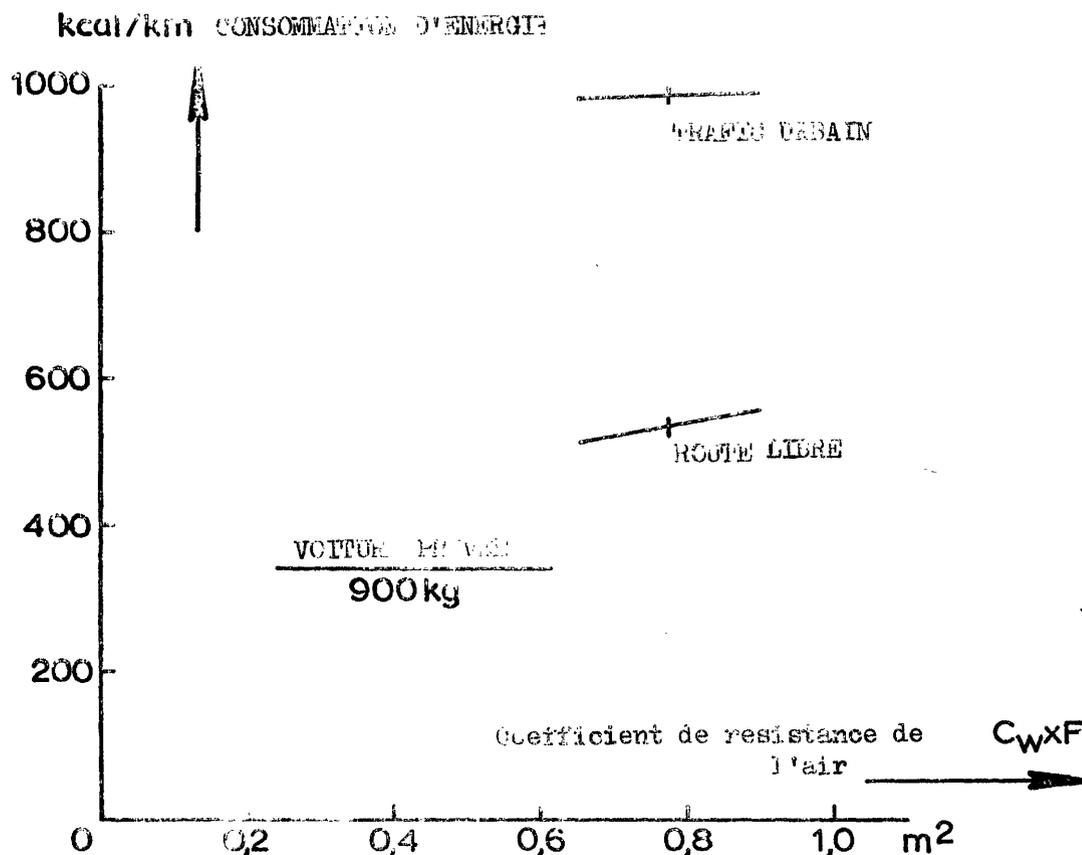


DIAGRAMME 34 EFFET CAUSE PAR DES MODIFICATIONS DE LA RESISTANCE DE L'AIR SUR LA CONSOMMATION D'ENERGIE

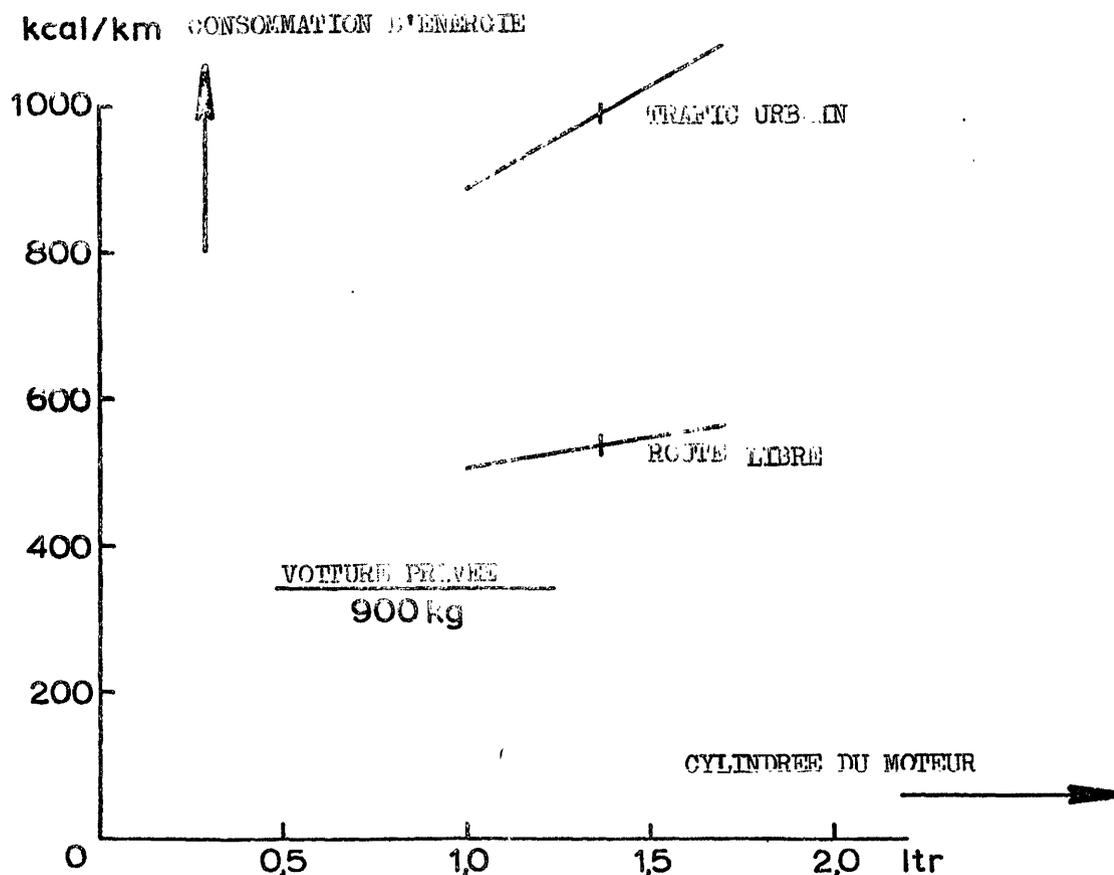


DIAGRAMME 35 EFFET DE LA CYLINDREE DU MOTEUR SUR LA CONSOMMATION D'ENERGIE (le poids du véhicule étant constant)

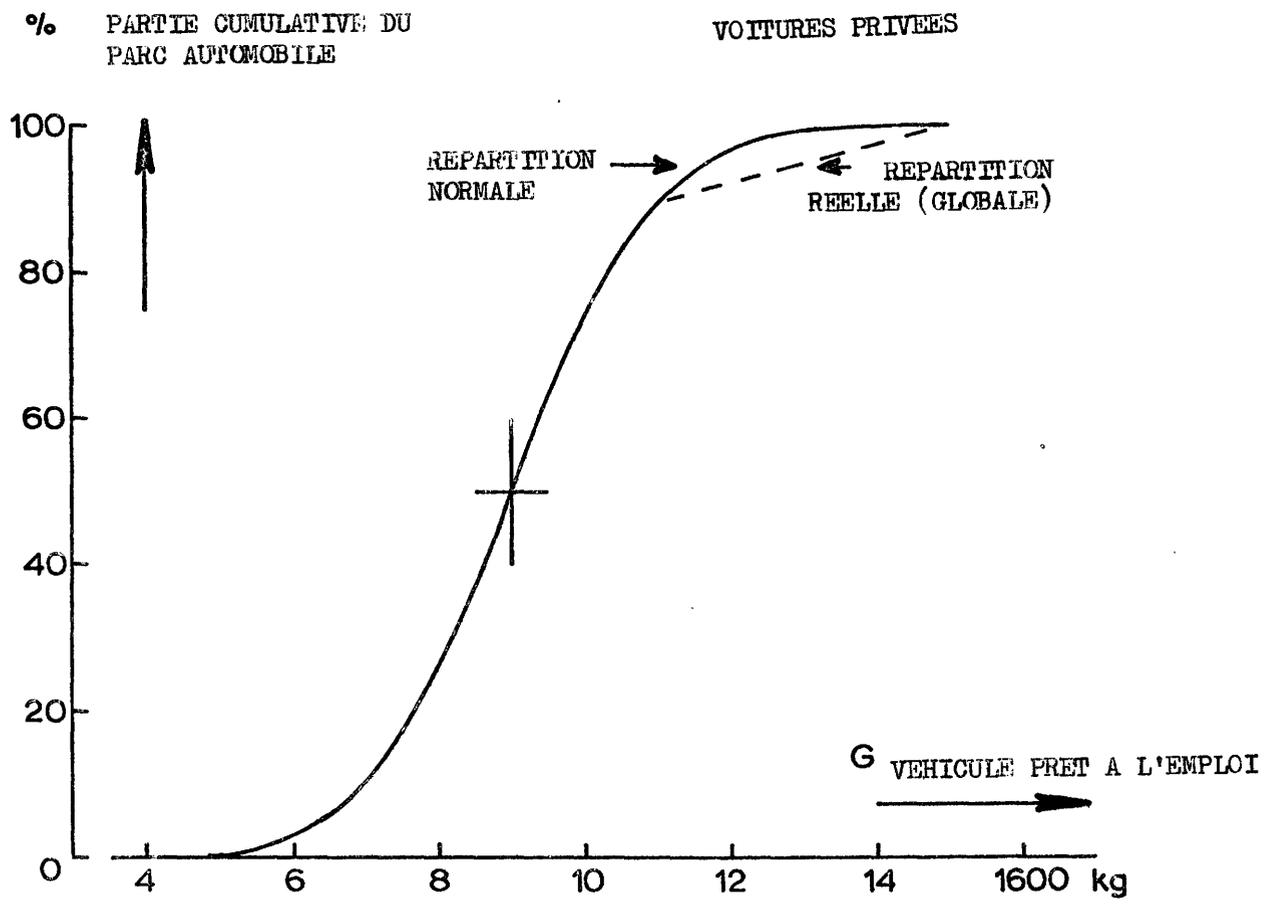


DIAGRAMME 36 REPARTITION DU PARC AUTOMOBILE EN FONCTION DE LA CATEGORIE DE POIDS

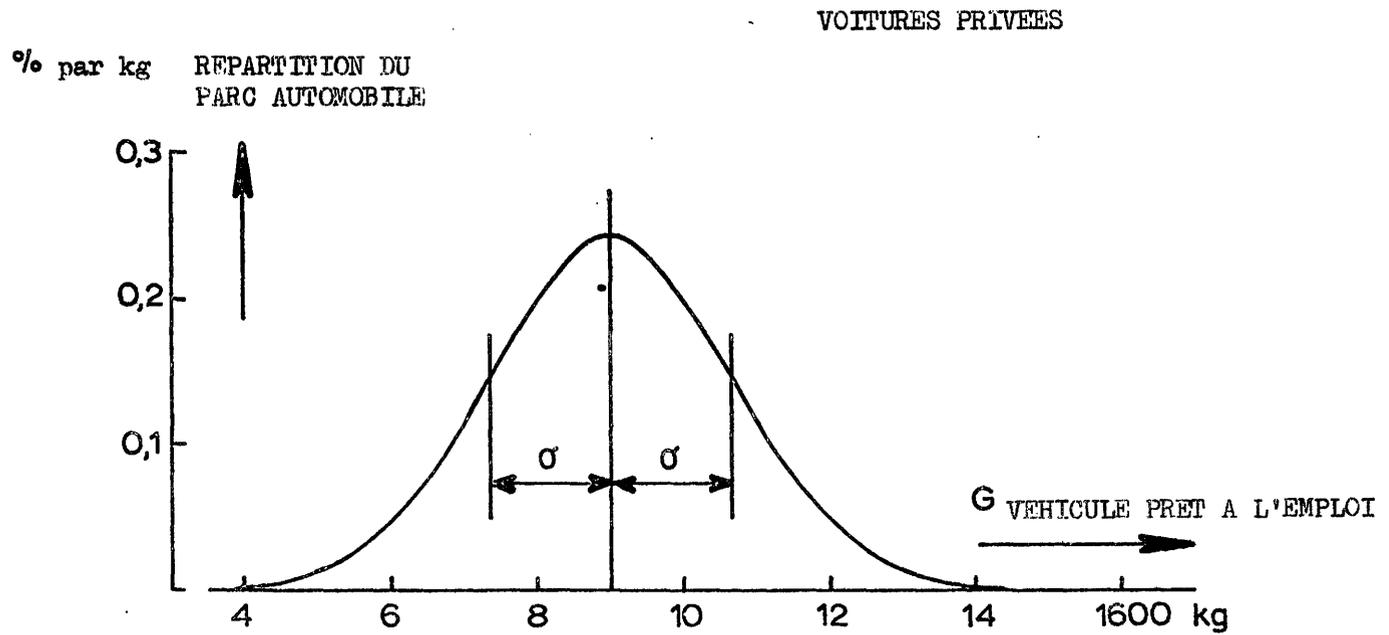


DIAGRAMME 37 REPARTITION DU PARC AUTOMOBILE EN FONCTION DE LA CATEGORIE DE POIDS

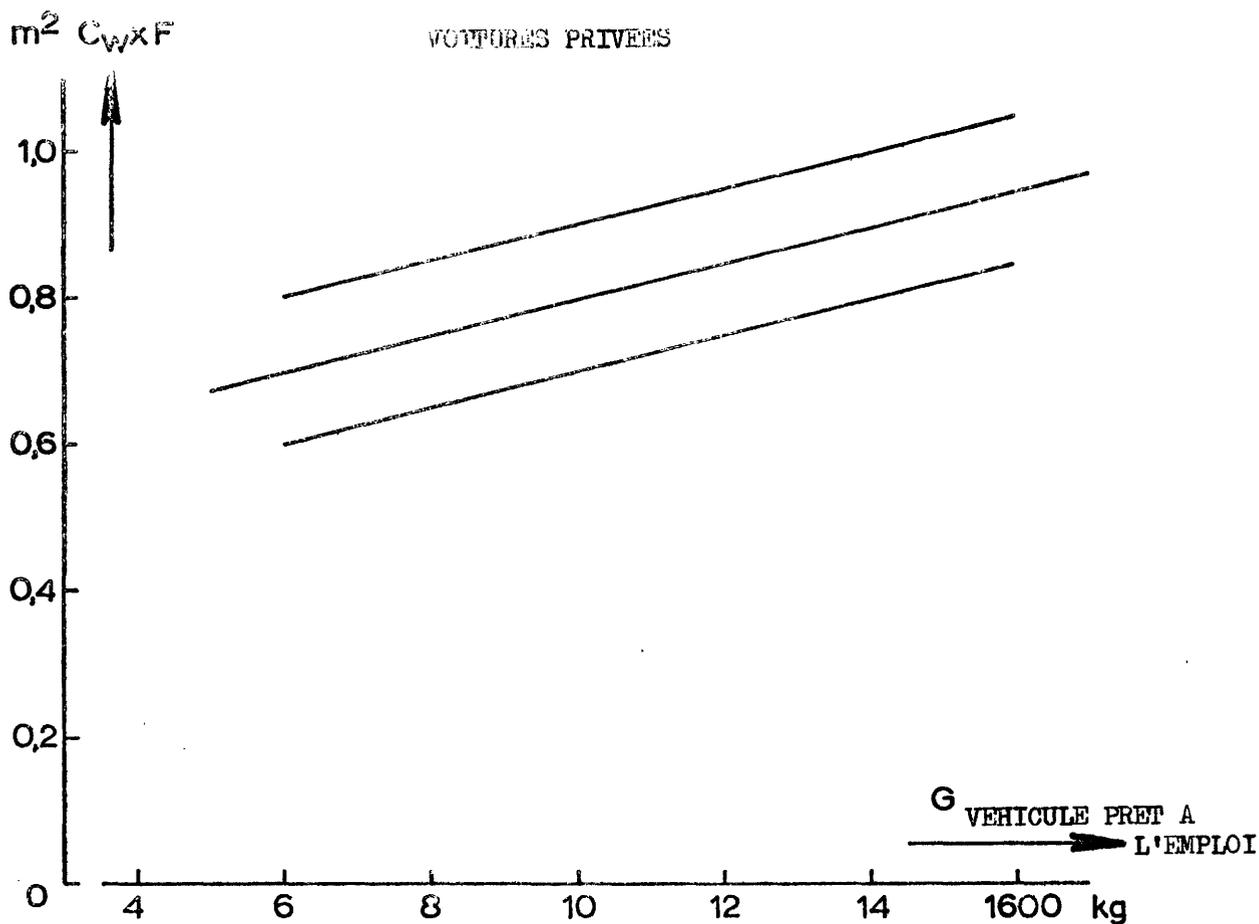


DIAGRAMME 38 RAPPORT ENTRE LE POIDS DU VEHICULE ET LES DIMENSIONS AERODYNAMIQUES

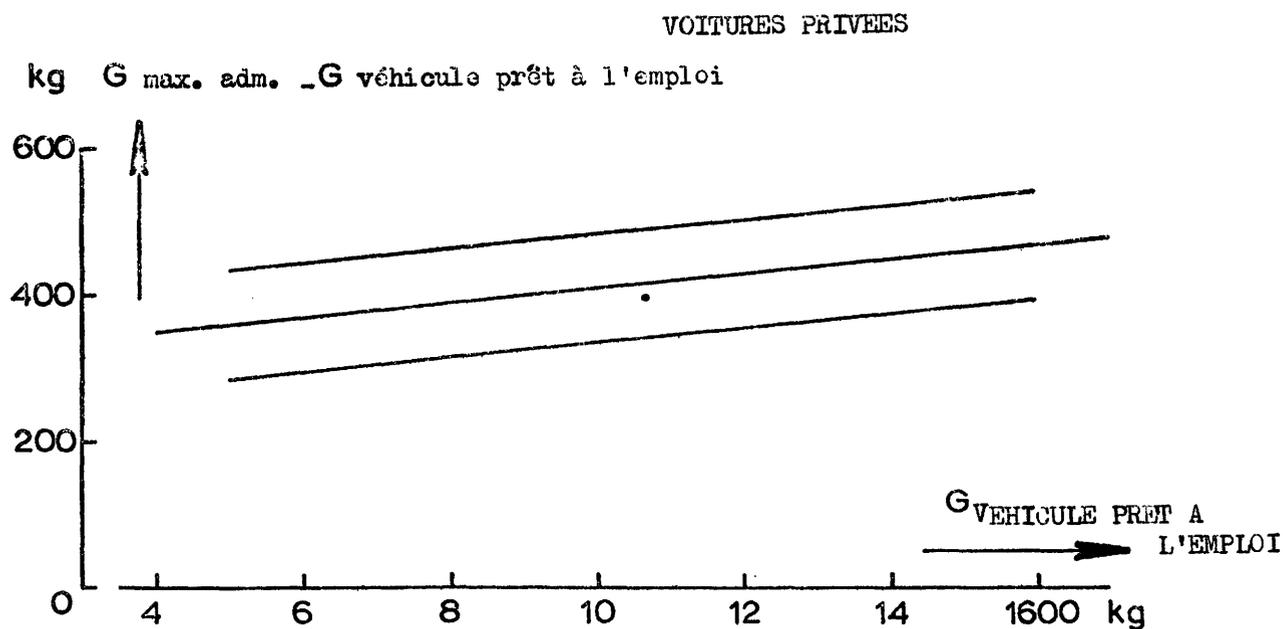


DIAGRAMME 39 RAPPORT ENTRE LE POIDS DU VEHICULE ET LA CHARGE ADMISSIBLE

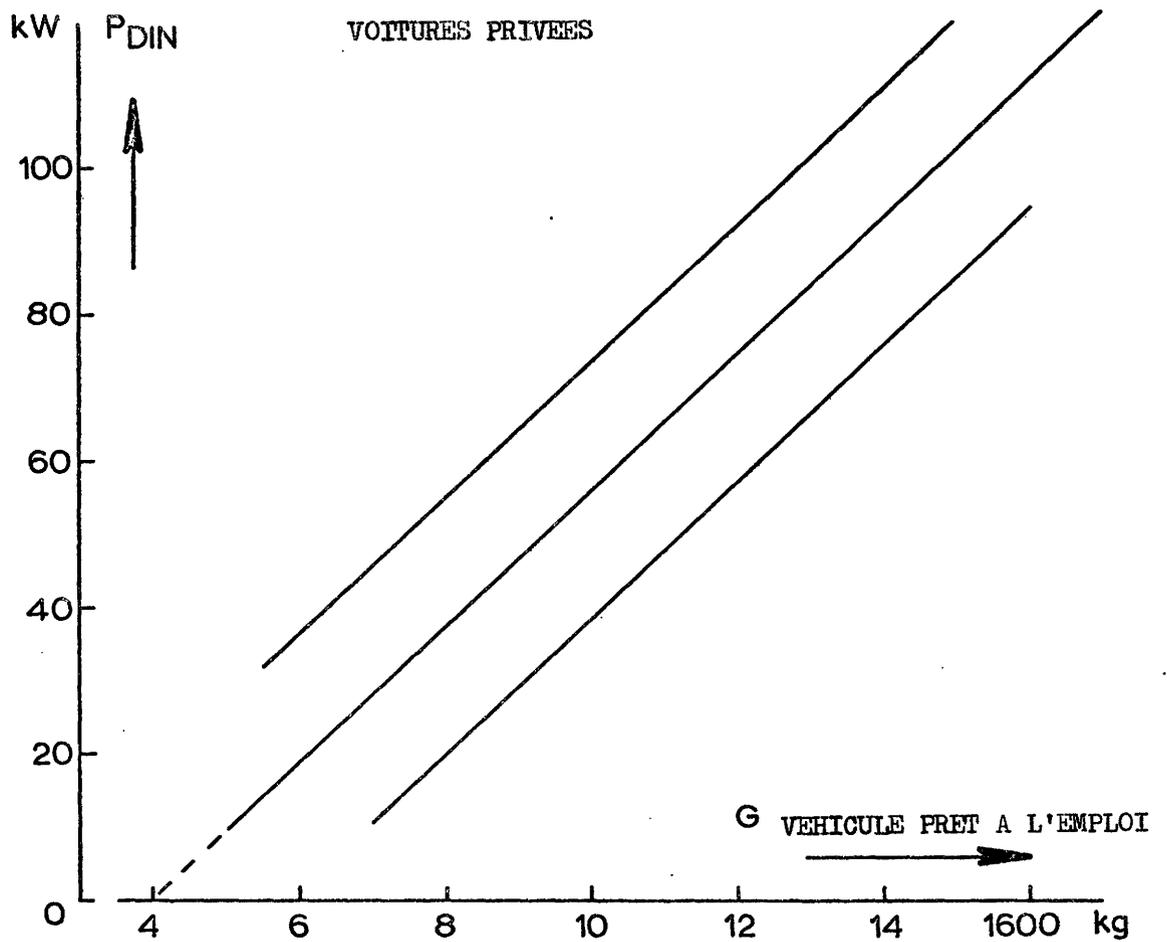


DIAGRAMME 40 RAPPORT ENTRE LE POIDS DU VEHICULE ET LA PUISSANCE DU MOTEUR

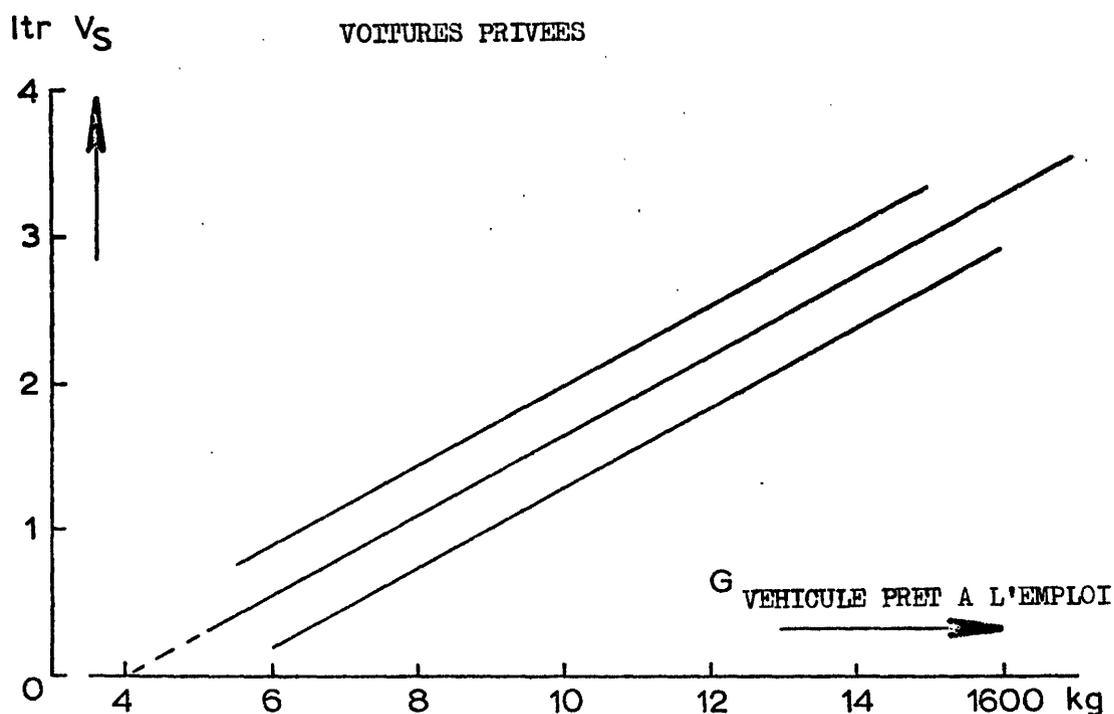


DIAGRAMME 41 RAPPORT ENTRE LE POIDS DU VEHICULE ET LES DIMENSIONS DU MOTEUR (CYLINDREE)



CYCLES DE FONCTIONNEMENT DES VEHICULES PRIVES

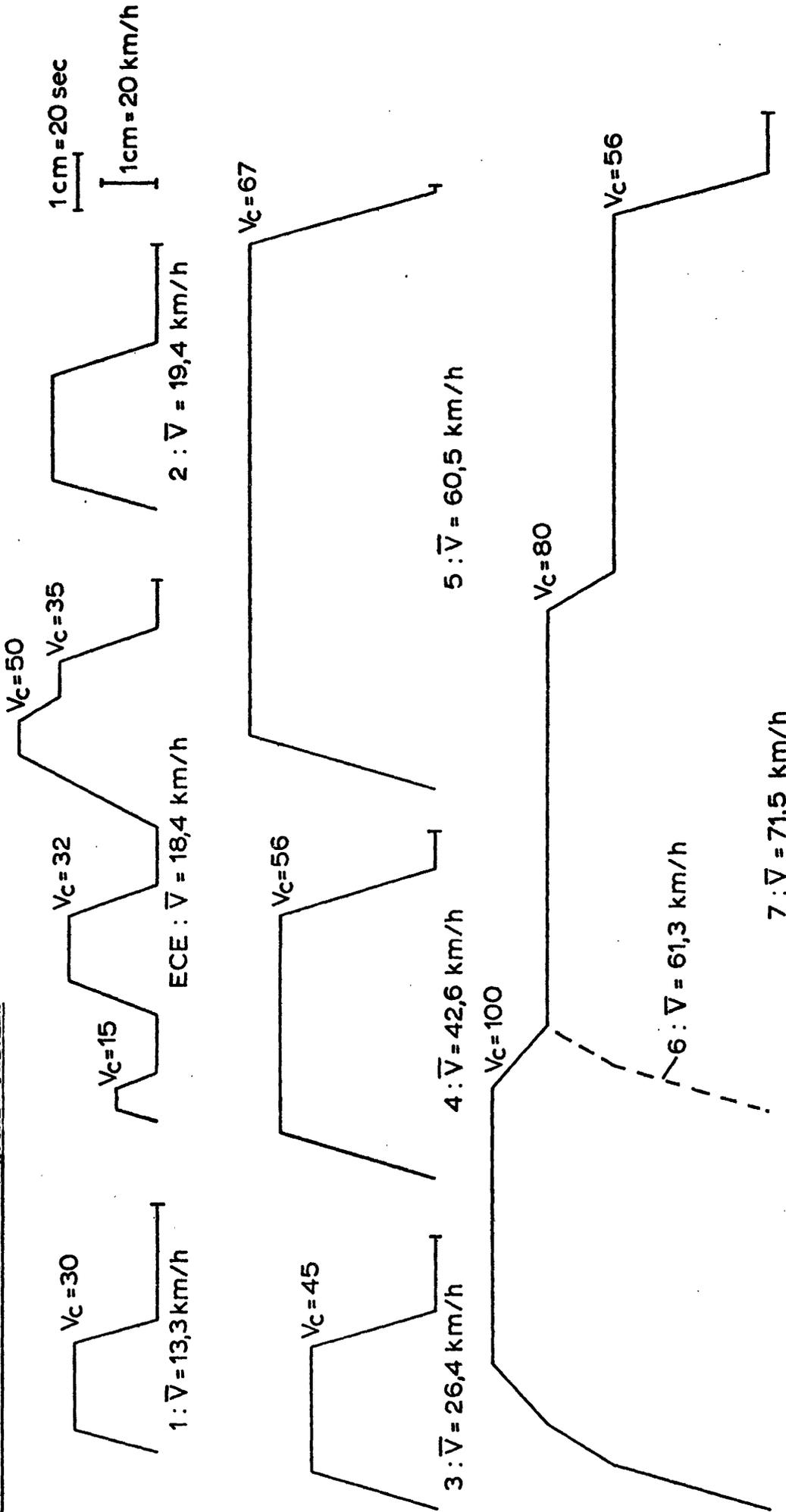


DIAGRAMME 42 CYCLES DE FONCTIONNEMENT APPLIQUES A L'ETUDE SUR MODELE

Classification du parc poids lourds

Le parc poids lourds peut faire l'objet de la classification globale ci-après (voir tableau 16).

1. Voitures de livraison
2. Camions légers
3. Camions lourds
4. Trains routiers

CATEGORIE 1

La catégorie des voitures de livraison comprend les véhicules dérivés des voitures de tourisme (correspondant aux "stationcars"), ainsi que les véhicules conçus spécialement pour la livraison (construction rectangulaire, cabine de conduite avancée). Pour ce dernier type également, on fait fréquemment usage de châssis de voitures de tourisme et presque toujours des mêmes moteurs.

Les voitures de livraison roulant surtout en ville, il faut donc qu'elles soient conçues pour la circulation urbaine (bonne accélération, manoeuvrabilité). Les dimensions de l'espace réservé au chargement prennent souvent plus d'importance que la charge utile en kg. Celle-ci est limitée notamment par le choix du châssis (voir diagramme 43). Le poids brut dépasse rarement 3,5 tonnes, compte tenu des diverses catégories de permis de conduire.

Lorsque des remorques sont utilisées, il ne s'agit que de remorques légères à un seul essieu et, dans ce cas également, le volume joue un rôle plus important que la charge utile. Le poids tracté admissible n'excède pas le tiers environ du poids brut admissible de la voiture motrice (voir diagramme 44).

Dans la catégorie 1a, la part des moteurs diesel est du même ordre que dans le cas des voitures particulières. Elle est sensiblement plus élevée dans la catégorie 1b, sans toutefois dépasser 10 %.

CATEGORIE 2

La catégorie des camions légers comprend les véhicules dont le poids brut varie de 4 à 8 tonnes. Dans cette catégorie, l'accent est plus nettement mis sur la charge utile (voir diagramme 46), bien qu'il arrive souvent que ces camions soient également utilisés en ville. Les moteurs employés sont soit des moteurs de voitures particulières, soit des moteurs dont la construction est identique.

Le rapport moteurs à essence/moteurs diesel est environ de 50/50. Bien que ces véhicules puissent en principe remorquer 1/2-2/3 de leur poids brut admissible (voir diagramme 45), ils sont généralement utilisés sans remorque. Un grand nombre de ces camions ont été aménagés pour permettre le transport d'un certain type de marchandises ou, pourvus d'une carrosserie fermée, font office de messagères. Cette catégorie de véhicules peut être considérée comme une extension de la catégorie 1.

CATEGORIE 3

La catégorie des camions lourds comprend tous les véhicules dont le poids brut se situe entre 8-15 tonnes environ. Une partie de ces véhicules est aménagée pour le transport d'un certain type de marchandises, mais la plupart d'entre eux conviennent à tous les chargements et sont souvent utilisés par des entreprises de transport. Ils doivent surtout pouvoir servir au transport sur d'assez longues distances. Les seuls moteurs utilisés sont des moteurs diesel dont la construction est axée sur la durabilité, eu égard au nombre de kilomètres annuels parcourus par ces camions. La puissance du moteur est généralement très proche du minimum exigé par la loi; elle est donc relativement plus faible que celle des véhicules de la catégorie 2 (voir diagramme 47). Les camions sont utilisés avec ou sans remorque, le poids de la remorque étant du même ordre de grandeur que le poids brut du camion (voir diagramme 45).

Le poids maximal du train routier est souvent déterminé par la puissance installée (6 cv/tonne sont imposés dans la plupart des pays européens) et non par la conception structurelle.

La répartition exacte du poids brut du train routier entre la voiture motrice et la remorque est déterminée par le nombre de roues, qui indiquent des variations brusques de la capacité de chargement. Parmi les véhicules de cette catégorie, une partie est composée de véhicules articulés. La charge utile est égale aux 2/3 environ du poids brut admissible (voir diagramme 46), quelle que soit la composition du train (un seul véhicule, voiture motrice + remorque, véhicule articulé).

CATEGORIE 4

Cette catégorie constitue en réalité la limite de la précédente. Le poids brut du train routier est déterminé par le maximum admis par la loi. La norme européenne est de 38 tonnes. Le poids brut admissible de la voiture motrice est soit 16 tonnes (2 essieux), soit 22 tonnes (3 essieux), avec respectivement 22 et 16 tonnes de charge tractée brute. Parmi les véhicules de ce groupe, 40 % environ sont composés d'une voiture motrice + véhicules articulés, dont la répartition est aussi 22/16 ou 16/22. Cette catégorie ayant manifestement été créée pour fournir une capacité de transport maximale, on peut admettre qu'il est rare que la voiture motrice roule sans remorque.

La puissance des moteurs varie de 230 cv (6 cv/tonne) à 320 cv environ (plus de 8 cv/tonne pour l'Allemagne). C'est surtout aux puissances élevées que l'on fait usage de turbo-compresseurs, afin de ne pas augmenter les dimensions (déjà considérables) des moteurs (12 l environ de cylindrée).

CARACTERISTIQUES CATEGORIE	POIDS BRUT		CHARGE UTILE		PARTICIPATION GLOBALE AU		PART DES MOTEURS DIESEL	REMARQUES
	Une seule voiture tonne	Train complet tonne	Une seule voiture tonne	Train complet tonne	Parc des véhicules %	Tonnage disponible %		
1. Voitures de livraison	a. 1,0-2,0	---	0,3-0,7	---	20	2	1	Dérivées des voitures de tourisme Avec moteurs de voitures de tourisme
	b. 2,0-3,5	---	0,6-2,0	---	50	15	10	
2. Camions légers	4 - 8	(6-14)	2 - 5	(3-10)	8	8	50	environ 5 % de véhicules articulés
3. Camions lourds	8 - 15	14-30	4 - 10	8-22	12	30	100	
4. Trains routiers	(16/22)	38	(9/13)	23-25	10	45	100	environ 40 % de véhicules articulés

Tableau 16 - Répartition du parc poids lourds

03-2-10004

LOW

CHARGE UTILE
(tonnes)

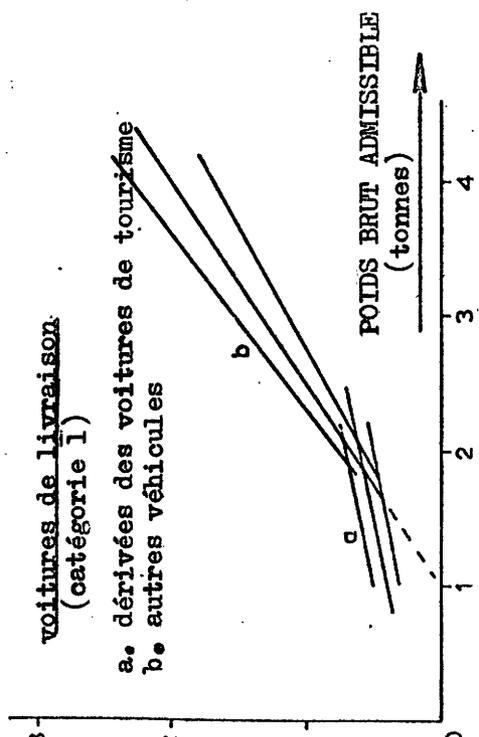


DIAGRAMME 43 RAPPORT ENTRE LE POIDS BRUT ADMISSIBLE ET LA CHARGE UTILE POUR LES VOITURES DE LIVRAISON

POIDS BRUT ADMISSIBLE
DU TRAIN ROUTIER (tonnes)

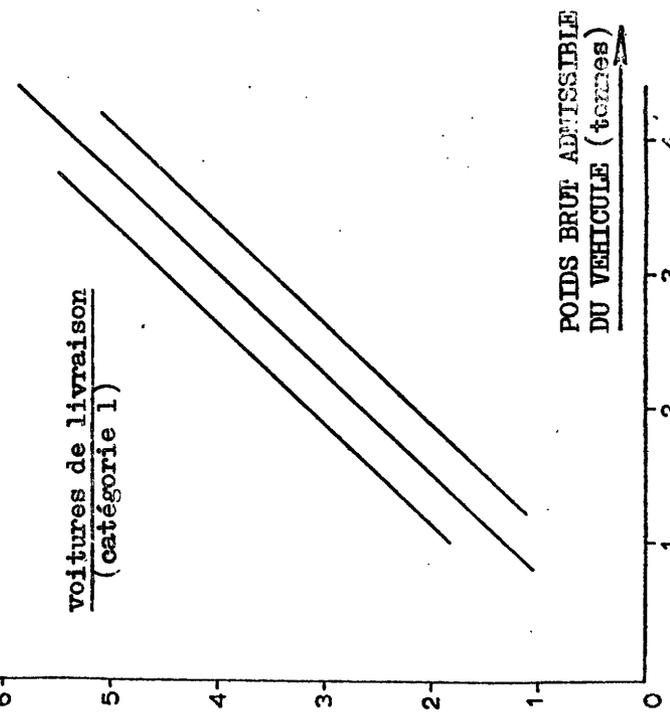


DIAGRAMME 44 RAPPORT ENTRE LE POIDS BRUT ADMISSIBLE DU VEHICULE ET LE POIDS BRUT ADMISSIBLE DU TRAIN POUR LES VOITURES DE LIVRAISON

POIDS BRUT ADMISSIBLE
DU TRAIN ROUTIER (tonnes)

camions
(catégorie 2,3 et 4)

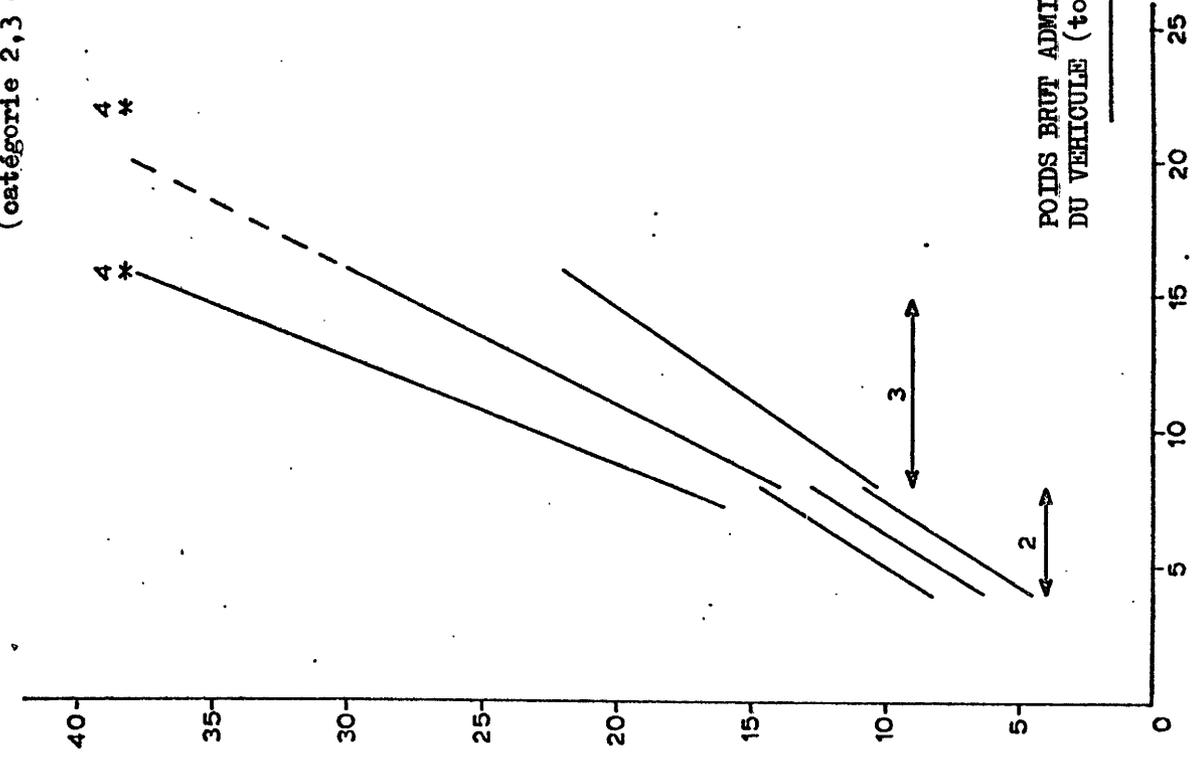


DIAGRAMME 45 RAPPORT ENTRE LE POIDS BRUT ADMISSIBLE DU VEHICULE ET LE POIDS BRUT ADMISSIBLE DU TRAIN POUR LES CAMIONS

CHARGE UTILE
(tonnes)

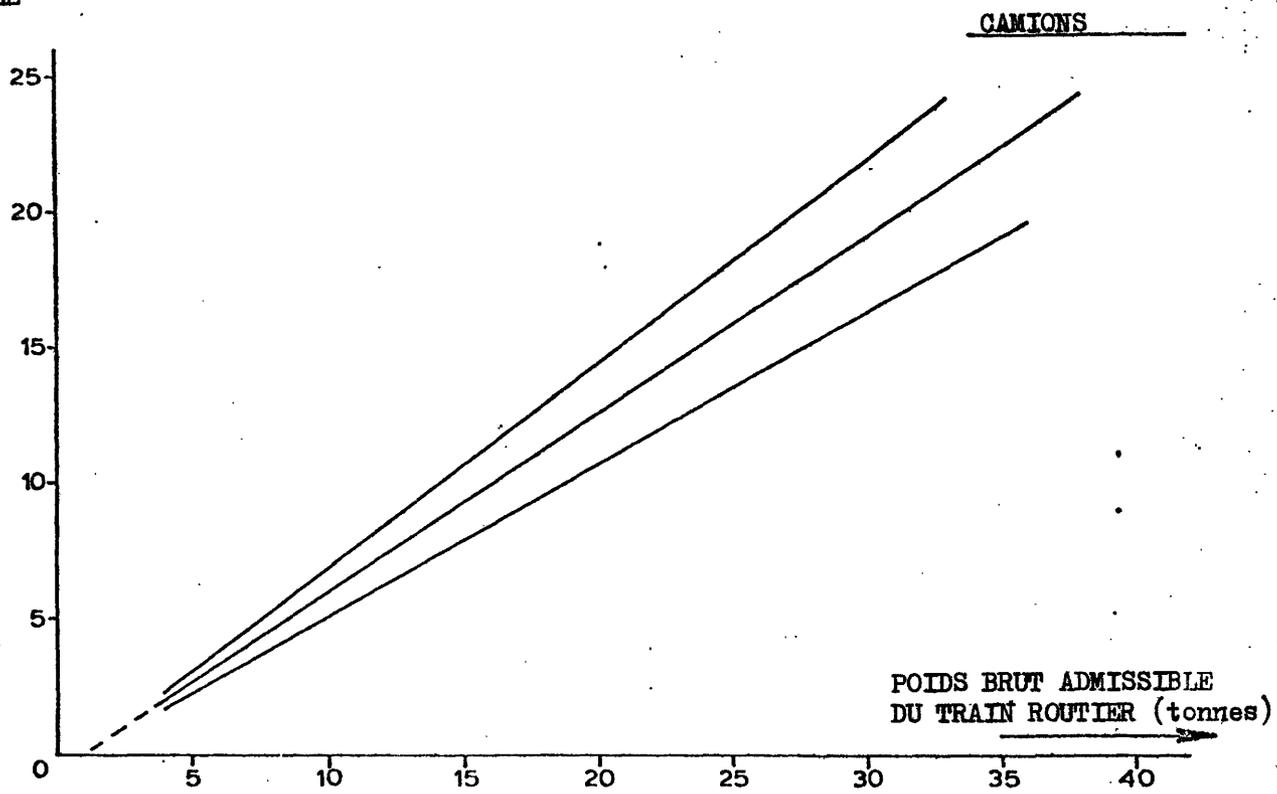


DIAGRAMME 46 RAPPORT ENTRE LE POIDS BRUT ADMISSIBLE DU TRAIN ROUTIER ET LA CHARGE UTILE POUR LES CAMIONS AVEC OU SANS REMORQUE ET VEHICULES ARTICULES

PUISSANCE DU MOTEUR (c.v.)

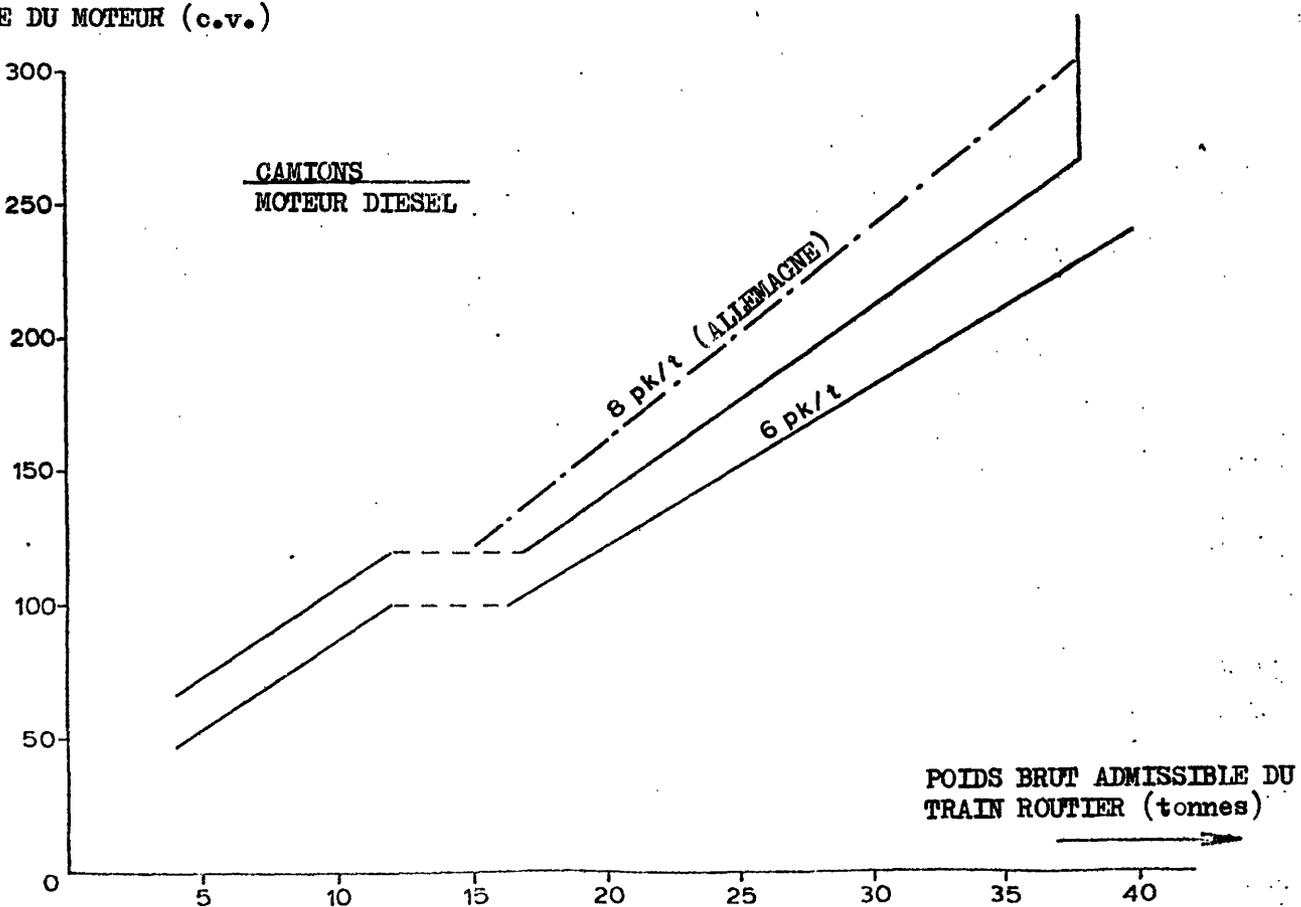


DIAGRAMME 47 RAPPORT ENTRE LE POIDS BRUT ADMISSIBLE DU TRAIN ROUTIER ET LA PUISSANCE INSTALLEE POUR LES CAMIONS



Facteurs de conversion

1 mile	=	1,609 km
1 gallon US	=	3,785 litres
1 gallon GB	=	4,546 litres
1 Btu	=	0,252 kcal
1 wh	=	0,86 kcal
1 Kwh	=	860 kcal
1 cv	=	0,7355 kw
1 mile par gallon US	=	0,425 km/litre
1 Btu/voyageur-mile	=	0,1566 kcal/voyageur-km
1 voyageur-mile/gallon	=	0,04 vkm/Kwh

Liste des tableaux

Tableau no.		page
1	Transport de voyageurs; contribution par moyen de transport aux Etats-Unis et en Europe	23
2	Prévisions relatives au transport des personnes aux Etats-Unis et en Europe	24
3	Consommation d'énergie relative au transport urbain de personnes, ventilée par type de véhicules	30
4	Comparaison de la consommation énergétique de divers moyens de transport public, selon des sources anglaises	31
5	Consommation d'énergie, par moyen de transport, du moyen de transport interurbain de personnes.	40
6	Prévisions du transport des marchandises aux Etats-Unis, Europe et Monde Occidental	52
7	Répartition du trafic de transport des marchandises en Europe	53
8	Composition du tonnage total de marchandises transportées par catégorie et participation par moyen de transport (Pays-Bas, 1968)	57
9	Changements intervenus dans la répartition par catégories de camions en Europe (1965-1980)	58
10	Consommation d'énergie par moyen de transport dans le transport de marchandises	66

Tableau no.		page
11	Nouveaux moyens de transport - Aperçu	86
12	Diverses données concernant les nouveaux systèmes de transport interurbains	87
13	Systèmes de trains rapides en développement	88
14	Comparaison entre la puissance installée de divers systèmes de transport actuels et futurs	89
15	Comparaison entre diverses sources d'énergie	93
16	Répartition du parc poids lourds	106

Liste des diagrammes

Diagramme no.		page
1	Répartition de la consommation d'énergie totale dans le secteur américain des transports (1965-1966)	20
2	Variations dans le temps de la consommation d'énergie propre aux divers moyens de transport de personnes	22
3	Relation entre la consommation d'énergie et le taux d'utilisation (Transport urbain de voyageurs - Moyens de transport divers)	32
4	Relation entre la consommation d'énergie et le taux d'utilisation. Dispersion possible de la consommation (Transport urbain de voyageurs - voitures particulières)	32
5	Relation consommation d'énergie/taux d'utilisation. Dispersion possible de la consommation (Transport urbain de voyageurs - Autobus)	33
6	Relation entre la consommation d'énergie et le taux d'utilisation. Dispersion possible de la consommation (Transport urbain de voyageurs - Tram-metro)	33
7	Influence des phénomènes de congestion sur la consommation énergétique (voitures particulières)	34
8	Influence du poids des véhicules sur la consommation d'énergie (voitures particulières)	35
9	Relation entre la consommation d'énergie et le poids des véhicules en trafic urbain	35
10	Influence de la vitesse moyenne sur la consommation énergétique des autobus	36
11	Relation entre la consommation d'énergie et le taux d'utilisation des autobus	36

Diagramme no.		page
12	Relation entre la consommation d'énergie et le taux d'utilisation (Transport urbain de voyageurs - Moyens de transport divers)	41
13	Relation entre la consommation énergétique et le taux d'utilisation. Dispersion éventuelle de la consommation (Transport interurbain de voyageurs - Voitures particulières)	42
14	Relation entre la consommation d'énergie et le taux d'utilisation. Dispersion éventuelle de la consommation (Transport interurbain de voyageurs - Autobus)	42
15	Relation entre la consommation énergétique et le taux d'utilisation. Dispersion éventuelle de la consommation (Transport interurbain de voyageurs - train)	43
16	Relation entre la consommation énergétique et le taux d'utilisation. Dispersion éventuelle de la consommation (Transport interurbain de voyageurs - Avion)	43
17	Influence de la charge sur la consommation énergétique (voiture privée)	47
18	Influence des normes américaines en matière d'émission sur la consommation énergétique des voitures privées	47
19	Surconsommation provoquée par des accessoires, tels que la climatisation et la direction assistée, en fonction de la vitesse de circulation (voitures privées)	48

Diagramme no.		Page
20	Consommation énergétique en fonction du poids du véhicule pour divers modèles de voitures privées	49
21	Variations dans le temps de la consommation d'énergie propre aux divers moyens de transport de marchandises	51
22	Consommation d'énergie en relation avec le poids total du véhicule (poids lourds)	67
23	Relation entre la consommation d'énergie et la vitesse moyenne pour les voitures de livraison	68
24	Relation entre la consommation d'énergie et le taux de chargement pour les voitures de livraison	68
25	Relation entre la consommation d'énergie et la vitesse moyenne (poids lourds)	69
26	Consommation d'énergie exprimée en fonction du poids total du véhicule pour divers taux de chargement (poids lourds)	69
27	Consommation d'énergie en fonction du taux de chargement (poids lourds)	70
28	Consommation d'énergie pour un tonnage donné de chargement, exprimée en fonction du poids admissible du train routier (poids lourds)	70
29	Consommation d'énergie primaire des systèmes urbains	75
30	Durée du trajet/distance de divers systèmes de transport	80

Diagramme no.		Page
31	Divers systèmes de sustentation à coussin	82
32	Rendement énergétique de divers systèmes de transport de personnes déjà existants/ nouveaux	90
33	Effet, des modifications intervenues dans la résistance, sur la consommation d'énergie (voit. privée)	97
34	Effet causé par les modifications de la résistance de l'air sur la consommation d'énergie	98
35	Effet de la cylindrée du moteur sur la consommation d'énergie (le poids du véhicule étant constant (voiture privée)	98
36	Répartition du parc automobile en fonction de la catégorie de poids (voiture privée)	99
37	Répartition du parc automobile en fonction de la catégorie de poids (voiture privée)	99
38	Rapport entre le poids du véhicule et les dimensions aerodynamiques (voiture privée)	100
39	Rapport entre le poids du véhicule et la charge admissible	100
40	Rapport entre le poids du véhicule et la puissance du moteur (voiture privée)	101
41	Rapport entre le poids du véhicule et les dimensions du moteur (cylindrée) (voiture privée)	101
42	Cycles de fonctionnement appliqués à l'étude sur modèle	102

Diagramme no.		Page
43	Rapport entre le poids brut admissible et la charge utile (camions)	107
44	Rapport entre le poids brut admissible du véhicule et le poids brut admissible du train pour les voitures de livraison	107
45	Rapport entre le poids brut admissible du véhicule et le poids brut admissible du train pour les camions	107
46	Rapport entre le poids brut admissible du train routier et la charge utile pour les camions avec ou sans remorque et véhicules articulés	108
47	Rapport entre le poids brut admissible du train routier et la puissance installée pour les camions	108

Références

(groupées par chapitres)

Introduction

1. "New Technology and Transportation 1970-1990"
Eurofinance, Paris 1971.
2. "The motorcar and Natural Resources" G. Leach, OECD,
1972.
3. "The potential for fuel conservation : the case of the
automobile".
"OECD-observer 1974, Februari.
4. "Transportation, Energy and Environmental issues"
Mitre-Corporation, Washington, 1972.

A. Transport de personnes

- 1,2,3,4
5. "Transportation Energy Use and Conservation Potential"
E. Hirst, Science and Public Affairs, November 1973.
6. "Energy Consumption for Transportation in the U.S."
E. Hirst, ORNL-NSF-EP-15, Oak Ridge, March 1972.
7. "How much overall energy does the automobile require",
E. Hirst, Automotive Engineering, July 1972.
8. "System Energy and Future Transportation" R.A. Rice
Technology Review, January 1972.
9. "Energy efficiencies of the Transportsystems" R.A. Rice
SAE-paper 730066, 1973.
10. "Historical perspective in Transport System Development"
R.A. Rice in Advanced Urban Transport Systems, Carne-
gie-Mellon University, 1970.
11. "Energy and the Automobile" SAE-paper SP 383, July 1973
12. "Privé vervoer versus openbaar vervoer" J.B. Zabel,
TNO-Nieuws-5-1972.

13. "Mens en milieu; deel 2- Zorg voor zuiver lucht"
door Stuurgroep voor Milieuzorg van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs. Uitgave Stichting Toekomstbeeld der Techniek no. 17, 1973.
14. "Nato conference on Technology of efficient Energy Utilization" October 1973.
bijdrage E. Massar van Siemens, Erlangen.
15. Voorstudies van rapport "Energie besparing" van Stichting Toekomstbeeld der Techniek, opgesteld door N.S., TH-Eindhoven, TNO.
16. "Automotive Research and development and fuel economy" Hearings before the Committee on Commerce U.S. Senate May-June 1973 Serial no. 93-41.
17. "The energy crisis: alternatives for transportation" J.P. Covington. Automotive Engineering. March 1973.
18. "The search for transportation alternatives" J.P. Covington. Automotive Engineering. January 1974.
19. "Passenger Car Fuel Economy Characteristics on Modern Superhighways" J.J. Cornell.
SAE-paper 650862; 1965.
20. "Transport moves off oil" G. Leach.
New Scientist 8 November 1973.
21. "Fahrzeugantriebe der Zukunft" Teil I und II.
H.J. Förster; K. Pattas, Automobil-Industrie 3/72-1/73
22. "The potential for energy conservation" A Staff Study. October 1972. Executive office of the President (U.S.A.)
23. "The automobile and Air Pollution: A Program for Progress". Part I and II, Report of the Panel of Electrically Powered Vehicles. October 1967.
24. "Fuel in Transport" R.G. Harman. Traffic Engineering and Control, February/March 1974.
25. "Alternatives to the Internal Combustion Engine; Impacts on Environmental Quality"
R.U. Ayres and R.P. Mc.Kenna.
26. "Gewone transmissie en automaat" Autokampioen 1974.

27. "Electric Car and Air Pollution" P.D. Agarwal.
SAE-paper 710190, January 1971.

B. Transport de marchandises

- 1,4,5,6,7,8,9,10,11,14,15,17,18,20,21,22
28. "Road haulage in Europe" Eurofinance, Paris, 1973.
29. "Kan het goederenvervoer over de weg worden teruggedrongen?" Drs. H.J. Noortman.
Intermediair 10^e jrg. 16-19 april 1974.
30. "Die energiefreundliche Bahn", H. Lehman, die Bundesbahn, 1973 (II).
31. "The effect of fuel price increases on energy intensiveness of Freight transport" Rand Corporation, 1971.
32. "Energy requirements for the Movement of intercity Freight" Battelle-Columbus, 1972.
33. Cijfers uit tabellen in tijdschriften; Railwaygazette 1971- blz. 390; Rail en Weg no. 66, blz. 11; Elektrische Bahn (1967) blz. 277 en (1968) blz. 220; Openbaar vervoer (1973) blz. 106; La Vie du Rail (1974) blz. 48; Beroepsvervoer (1973) blz. 688-691; 1033 en 1836-1837; Autotechnisch Tijdschrift no. 1- 1974 blz. 3-6; Lastauto und Omnibus 1972-1973; Diesel Equipment Superintendent, October 1973.

C. Nouveaux moyens de transport

- 1,8,10,14,15,17,18
34. Advanced Urban Transportation Systems, Carnegie-Mellon University, 1970.
35. "Wettkampf der Systeme in der Personen-und Guterbeförderung" E. Lippl VDI-Zeitschrift 114 (1972) nr. 7- blz. 477.
36. "Schnellst-bahnen und Spurkranz-führte Eisenbahnen; ein wirtschaftlichkeits Betrachtung" E. Lippl VDI-Zeitschrift 114 (1972) nr. 5- blz. 308.

37. "Geavanceerde railtransportsystemen"
Electrotechnische Vereeniging. Technische Hogeschool
te Delft, Afdeling Electrotechniek.
zie ook "De Ingenieur" 29-11-73.
38. "Are high speed trains on the right track", I. Yeansly,
New-Scientist 6-9-73.
39. "Innovational Ground Transport in Europe" Eurofinance,
Paris, 1972.

D. Comparaison des diverses sources d'énergie

11,16,21,23,25,27

40. "Methanol: A Versatile Fuel for Immediate Use"
T.B. Reed and R.M. Lerner. Science, 28 Dec. 1973.
Vol. 182.
41. "Critical Comparison of Low-Emission Otto and Rankine
Engine for Automotive Use" J.W. Bjerklie and B. Stern-
licht. SAE-paper 690044. 1969.
42. "Auto/Fuels: R and D Program Plans".
Energy Today Vol. 1, Number 12, Feb. 25, 1974.
43. "De elektrische auto" W. van Gool.
Intermediair 4^e jrg. 25 oktober 1968.
44. "Unconventional Thermal, Mechanical, and Nuclear Low-
Pollution-Potential Power Sources for Urban Vehicles"
J.A. Hoess and R.C. Stahman. SAE-paper 690231, 1969.
45. "The Time has come to look to Alternative Fuels"
D. Goodsell, Automotive Design Engineering Vol.13, 1974.
46. "Alcohols and Hydrocarbons as Motor Fuels"
SAE-SP-254, 1964.
47. "Ammonia as a Spark Ignition Engine Fuel: Theory and
Application" E.S. Starkman; H.K. Newhall; R. Sutton;
T. Maguire and L. Farber. SAE-paper 660155.
48. "Ammonia Fuel-Engine Compatibility and Combustion"-
J.T. Gray, Jr., E. Dimitroff; H.T. Meckel and R.D. Quil-
lian, Jr. SAE-paper 660156.
49. "Alternative Nonpolluting Power Sources"
R.U. Ayres. SAE-Journal, December 1968 pp 40-80.

TW

50. "Kraftstoffhandbuch" F. Jantsch, Stuttgart 1960.
51. "Chemical Engineers Handbook" McGraw-Hill.
52. "Power Systems for Electric Vehicles"
Public Health Service Publication no. 999-AD-37.

03-2-10004