

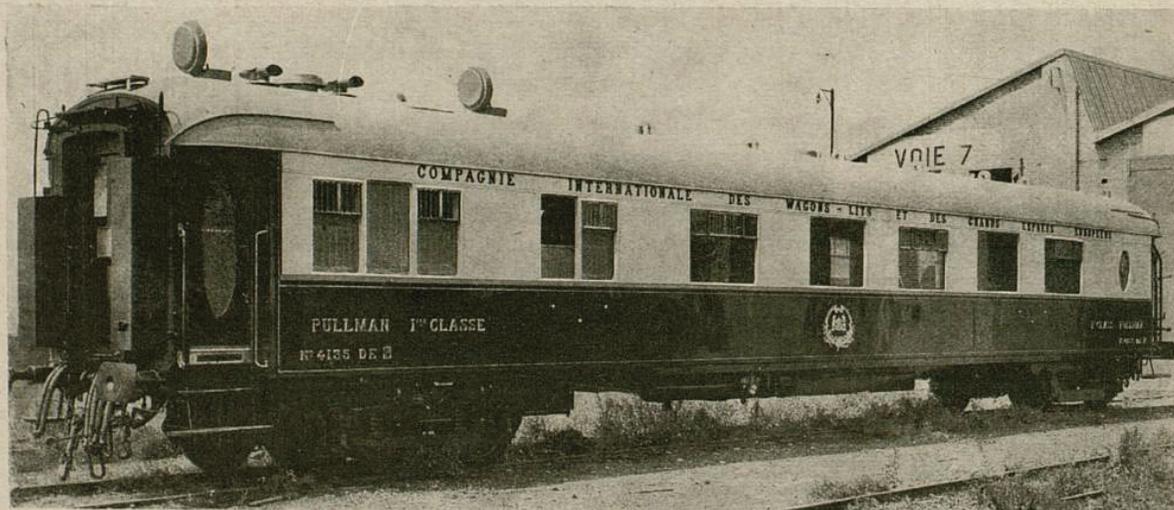
EMPLOI DANS LE MATÉRIEL MOBILE

Il est évident que le duralumin, métal léger et résistant, est indiqué pour construire tout ce qui se meut. Dès qu'il y a déplacement d'un objet pesant, il y a une dépense d'énergie qu'on doit chercher à réduire. Qu'on jette les yeux autour de soi! On verra que pour extraire du charbon de la terre, construire une maison, entraîner une voiture automobile, etc..., il faut lutter contre la pesanteur. Dans nombre de cas, ce sont des métaux ferreux qu'on déplace qui pèsent près de trois fois plus que le duralumin. Qu'on imagine l'énergie formidable économisée le jour où le duralumin serait substitué à l'acier. Certes, nous ne nous leurrerons pas et nous disons tout de suite que le duralumin ne peut être substitué partout à l'acier. Mais il y a nombre de cas spéciaux où l'énergie économisée est telle qu'elle

permet largement de payer le surprix du duralumin. Par exemple, il peut être avantageux pour une mine dont la profondeur d'extraction a augmenté et dont la machine est devenue insuffisante, de remplacer ses cages de mines en acier par d'autres en duralumin.

Pour le calcul du prix du métal, il ne faut pas oublier que dans le cas des métaux ferreux, le déchet n'a pratiquement aucune valeur. Au contraire, le déchet de duralumin conserve environ les 2/5 de la valeur des tôles à l'état de neuf. Cette récupération réduit la dépense supplémentaire due au duralumin.

Pour cette classe d'emplois, nous examinerons les chemins de fer, autobus, tramways, automobiles, bicyclettes, etc...



Voiture à toiture en duralumin de la Compagnie Internationale des Wagons-Lits, construite par les Entreprises Industrielles Charentaises.

LE DURALUMIN

DANS LE MATÉRIEL ROULANT

CHEMINS DE FER ET TRAMWAYS

Les vues qui illustrent cet article montrent la construction en duralumin, par les Entreprises Industrielles Charentaises des toitures de Voitures de la C^{ie} des Wagons-Lits. Les tôles de duralumin sont assemblées par rivets en duralumin. Les arceaux seuls sont en acier. 604 kg de duralumin sont employés dans chaque toiture.

Les conditions de sécurité toujours primordiales dans le transport des voyageurs ont peu à peu imposé la construction métallique aux Compagnies de Chemins de Fer. Par sa grande résistance, le matériel métallique diminue considérablement les dangers en cas d'accident et il présente, avec l'avantage d'être incombustible, celui de supprimer les éclats très meurtriers que produit le bois en se brisant. Il en résulte malheureusement une augmentation importante de poids et la puissance des locomotives est devenue insuffisante pour remorquer sans réduction du nombre des voitures, des trains composés de véhicules pesant jusqu'à 45 à 50 tonnes. On a donc cherché à alléger cette construction pour permettre, sans diminuer le confort ni le nombre de places disponibles dans un train, l'utilisation des machines existantes, la réalisation de vitesses commerciales élevées et la bonne conservation de la voie.

Les avantages de l'allègement du matériel roulant peuvent être envisagés à des points de vue différents, qu'il s'agisse d'accroître la capacité de transport de lignes arrivées à leur limite d'exploitation, qu'il s'agisse d'utiliser des locomotives encore en état, mais dont la puissance est devenue trop faible,

qu'il s'agisse de réduire les dépenses d'énergie ou d'exploitation en général ou qu'il s'agisse enfin de diminuer les frais de premier établissement, ceci en particulier dans le cas de la traction électrique. En effet, l'économie d'énergie a sa répercussion sur l'importance des parcs de machines, des sous-stations, des lignes de distribution de courant.

Les résistances principales auxquelles donne lieu la traction des véhicules sont en effet proportionnelles au poids transporté, que les résistances soient permanentes (en palier et alignement) ou accidentelles (courbes et rampes).

Il faut signaler aussi comme proportionnelle au poids brut transporté, l'énergie nécessaire lors des mises en vitesse, soit pour vaincre l'inertie de l'ensemble du convoi, soit pour vaincre celle des parties animées d'un mouvement rotatif.

Par contre, l'énergie destinée à vaincre la résistance de l'air est indépendante du poids transporté et ne dépend que de la forme des véhicules. On sait l'importance que prend cette résistance par rapport à la résistance totale dès que la vitesse prend de grandes valeurs.

Parmi les résistances énumérées ci-dessus, certaines ont pu être en partie réduites directement par des améliorations techniques. C'est ainsi qu'on a cherché à diminuer la résistance à la fusée en employant les essieux à rouleaux. Les résultats obtenus sont intéressants, mais il ne s'agit là, en somme, que d'une amélioration de détail.

Des possibilités beaucoup plus larges sont offertes par la diminution du poids brut transporté qui permet de diminuer proportionnellement l'énergie consommée par les résistances autres que celles de l'air. L'allègement du véhicule paraît donc être la solution la plus intéressante et la plus complète; nous nous proposons de montrer ici de quelle façon des alliages légers peuvent concourir à cet allègement.

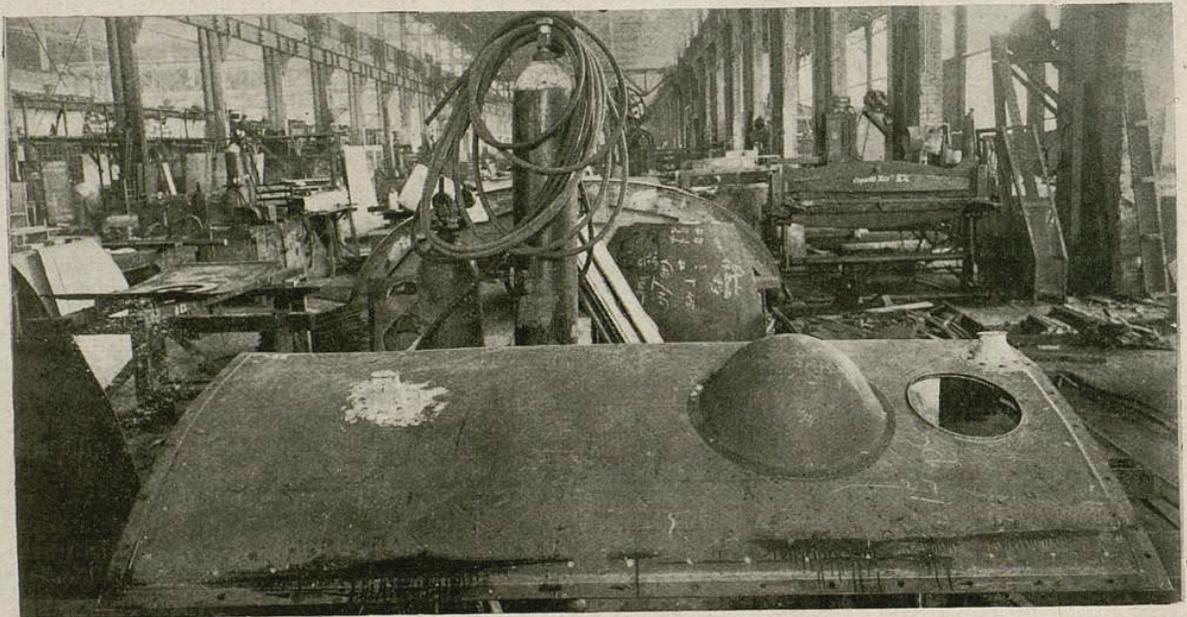
Dans tout ce qui suit, il sera bien entendu que nous comprenons l'emploi des alliages légers comme devant être effectué dans tous les cas à égalité de résistance avec les matériaux qu'ils sont destinés à remplacer. C'est donc, non pas à sécurité égale que se fera ce remplacement, mais nous pourrions dire à sécurité accrue, puisque la diminution de poids diminue l'inertie et par conséquent le travail à absorber en cas d'accident.

La dimension de certaines pièces de la voiture pourrait, à première vue, être diminuée sans qu'il soit besoin de changer le matériau utilisé, mais

dans la plupart des cas, on reste limité dans la diminution des épaisseurs par la possibilité de flambements locaux, de danger de corrosion, qui sont autant de difficultés que l'emploi des métaux autres que les métaux légers ne permet pas de résoudre.

Par l'emploi rationnel des alliages d'aluminium à haute résistance, il est possible d'obtenir un allègement réel important sans nuire à la solidité du matériel, à sa durée de service et à la sécurité des voyageurs. Dans une voiture, le travail demandé à chaque élément de la construction va en augmentant de haut en bas; par suite tout allègement d'un élément supérieur a sa répercussion sur les éléments inférieurs. Sur une motrice, la diminution de poids entraînera en outre une réduction de la puissance des moteurs, c'est-à-dire de leur poids; dans ce cas, l'utilisation aussi complète que possible de l'adhérence du véhicule doit aller de pair avec l'allègement.

C'est ainsi qu'en particulier l'allègement indirect donne la possibilité d'alléger les parties non suspendues, allègement qu'impose du reste la bonne tenue de la voiture aux grandes vitesses. On sait en effet que cette tenue dépend : du rapport du poids suspendu au poids non suspendu qui ne doit pas descendre au-dessous d'une certaine valeur, de



Chaudronnage de tôles de duralumin pour toiture de wagon-lit — (Entreprises Industrielles Charentaises).

la position du centre de gravité qui doit être suffisamment haut, du rayon de giration autour de l'axe passant par les centres d'oscillation des traverses danseuses des bogies qui doit être le plus grand possible pour éviter les oscillations courtes.

Il s'ensuit que si l'on veut dépasser un taux d'allègement de 20 à 25 % et conserver les mêmes qualités de tenue pour grandes vitesses, il faut envisager parallèlement l'allègement des bogies.

Possibilité et caractéristiques de la construction en alliages légers à haute résistance

Grâce aux progrès récents de la métallurgie des alliages légers, on peut envisager leur emploi dans la presque totalité des éléments de la construction du matériel roulant. On trouvera plus loin quelques exemples de réalisations partielles et complètes. Il convient toutefois de ne pas perdre de vue les considérations qui précèdent si on veut obtenir une bonne tenue de la voiture et tirer de l'allègement tous les avantages qu'il est susceptible d'apporter. Enfin, il est nécessaire de faire une adaptation un peu spéciale de la construction à ce nouveau matériau en raison de ses caractéristiques et de son prix.

Si on compare le duralumin à l'acier doux, on constate que les caractéristiques des deux métaux sont très voisines, mais que leur densité est à peu près dans le rapport de 1 à 3. Il ne faut pas, cependant, perdre de vue la faible valeur du module d'élasticité du duralumin (7.500 au lieu de 20.000 pour l'acier). C'est-à-dire que dans le domaine élastique la flèche prise par la pièce en duralumin, toutes choses égales d'ailleurs, est près de trois fois plus grande que celle prise par la même pièce en acier. De là naît l'obligation, pour conserver le maximum d'allègement, de donner aux pièces en alliage léger des formes à grand moment d'inertie; les formes tubulaires ou à caisson sont celles qui conviennent le mieux. Ces formes appropriées, permettent en outre d'éviter le flambage des pièces auxquelles s'applique la formule d'Euler. Pour les tôles planes de panneautage en duralumin, il faut majorer de 20 % les épaisseurs par rapport à celles des tôles d'acier si l'on désire avoir une rigidité équivalente.

Il y a lieu de remarquer à ce propos que cette faible valeur des modules d'élasticité est un avantage dans le cas des chocs. L'alliage léger absorbera en effet, dans ce cas, à taux de travail égal, trois fois plus d'énergie que l'acier. Sous un choc qui fait subir à ce dernier des déformations considérables, le duralumin se comporte encore d'une manière parfaitement élastique.

On voit de quelle façon il y a lieu d'envisager la construction en duralumin. Les formes à grand moment d'inertie et fermées peuvent être réalisées aisément par assemblage de profilés, de bandes ou de tôles pliées, entretoisés ou munis d'emboutis de raideur. L'assemblage par rivets donnera toute sécurité, s'il est correctement effectué. Si pour des raisons d'esthétique on désire supprimer l'apparence de la tête du rivet, on peut adopter la solution du rivet à tête fraisée avec un couvre-joint d'une épaisseur suffisante. C'est une solution préférable à celle de la soudure autogène qui, détruisant en partie le traitement thermique, ne peut être envisagée que pour les parties qui travaillent peu.

On étudie actuellement l'adaptation de la soudure électrique par points qui permettrait une solution intéressante dans le cas où le rivetage serait complètement prohibé. Dès maintenant ce mode de soudure est au point pour les tôles de faible épaisseur (épaisseur inférieure à 12/10^e).

D'une manière générale, il ne faut pas perdre de vue que le duralumin doit la plus grande partie de ses propriétés mécaniques élevées au traitement thermique et que par conséquent toute pièce qui a été recuite pour effectuer des travaux de cintrage par exemple, doit être trempée à nouveau.

Si la légèreté du duralumin est sa principale qualité, il offre en outre l'avantage d'être inoxydable, il donne une économie au point de vue peinture et entretien, il permet des manutentions plus aisées en cours d'exécution et l'obtention facile de certains profilés. Ses propriétés, loin d'être altérées sont améliorées par le temps¹.

1. On sait l'influence du « vieillissement » sur le duralumin. Les expériences faites par les Services de l'Aéronautique, il y a quelques années, ont montré qu'en 10 ans la charge de rupture et la limite élastique augmentaient d'environ 2 kg., les allongements restant constants.

Taux d'allègement

D'une façon générale on peut calculer qu'en employant d'une manière étendue le duralumin dans la construction du matériel roulant on peut obtenir sur l'ensemble un allègement de 50 % tout en conservant les essieux montés, les ressorts, les boîtes à graisse et les attelages en acier ainsi que la plupart des éléments de l'aménagement en bois, en verre, en carton, etc... En ce qui concerne la construction proprement dite en alliages légers, on

peut atteindre facilement une économie de poids de 60 % à 65 % et même 75 %.

Nous donnons ci-joint, tableau 1, les caractéristiques d'emploi des métaux légers dans quelques véhicules déjà réalisés et dans quelques projets en cours d'étude.

Il n'est pas exagéré d'admettre qu'à égalité de résistance la tonne d'allègement direct nécessite 0 t. 75 de duralumin dans le cas de l'introduction limitée de l'alliage d'aluminium et seulement 0 t. 50 dans le cas d'un emploi généralisé parce qu'on bénéficie ainsi d'un allègement indirect important.

TABLEAU 1

APERÇU DES ALLÈGEMENTS PROCURÉS PAR L'EMPLOI DES MÉTAUX LÉGERS

REALISATIONS	Poids ancien	Métaux lourds remplacés	Al. employé	Allègement absolu	Allègement relatif
Voiture des Chemins de Fer du Nord.	52 à 53 T.	7 à 8 T.	2 T. 932	4 à 5 T.	9 à 11 %
Voiture du Pennsylvania Railroad	56 T. 5	9 T. 900	3 T. 910	5 T. 990	10 %
Voiture de l'Illinois Railroad (automotrice électrique).	42 T. 5	8 T. 5	3 T.	5 T. 5	12 %
Tramways de Cleveland.	19 T. 580	8 T. 830	2 T. 990	5 T. 840	30 %
(1) Voiture de la Metallgesellschaft pour la Ceinture de Berlin.	38 T.	25 T.	6 T.	19 T.	50 %
Automotrice (semi-Diesel) pour les Chemins de Fer du Hartz.	20 T.	10 T.	4 T.	10 T.	50 %
PROJETS.					
Voiture pour grandes lignes (type OCEM).	40 T.	16 T. 5	6 T. 5	10 T.	25 %
Voiture pour banlieue (remorque)	30 T.	10 T.	4 T.	6 T.	20 %
Voiture pour banlieue (motrice).	48 T.	12 T.	4 T.	8 T.	17 %

(1) L'allègement comprend 4 à 5 T. d'allègement d'ordre constructif, ce qui donne en réalité un allègement relatif de 38 à 39% dû à l'emploi des métaux légers.

Coût de l'allègement

Etant donné le prix relativement élevé des alliages d'aluminium, on a pu se demander si le remplacement de l'acier par le duralumin présentait un intérêt économique. Le bilan d'une telle opération n'est pas toujours aisé à établir car, d'une part, les conditions d'exploitation du matériel sont très variables et d'autre part, certains avantages, pour indiscutés qu'ils soient, sont difficilement chiffrables.

Nous donnons ci-dessous les résultats des calculs établis après études des différents bilans et analyse aussi complète que possible des facteurs en présence¹.

Il est normal de considérer que les prix de fabrication sont les mêmes dans les deux constructions, encore que les manutentions, l'usinage, soient plus

1. NOTA. — Le détail de cette étude qui ne saurait trouver sa place ici, pourra être communiqué sur demande aux personnes intéressées.

faciles et plus rapides en ce qui concerne le duralumin. Admettons comme prix de base moyen :

Pour le duralumin Frs. 20.000 (2) la tonne
 Pour l'acier » 1.500 » »

ce qui donne comme prix de la tonne d'allègement en remplaçant l'acier par le duralumin :

à volume égal	à résistance égale
8.660 fr.	13.530 fr.

Ces chiffres ne tiennent pas compte de la valeur de récupération du métal léger en fin de service de la voiture qui a été fixé dans les calculs à : six francs le kilog¹.

Lorsque l'allègement indirect porte sur du matériel spécial autre que celui de la construction ordinaire (équipement électrique, équipement mécanique...) les chiffres indiqués ci-dessus sont très sensiblement diminués.

Dans le cas de la traction électrique, pour se rendre compte si l'opération de remplacement de l'acier par le duralumin dans les voitures est payante, on a admis :

	prix du Kw. H.	Consommation d'énergie par T. km.
pour les grands parcours	0 fr. 30	0,020
pour la banlieue	0 fr. 40	0,035

Amortissement du matériel en trente ans ;
 Taux de 9 % pour l'intérêt d'amortissement.

Avec ces données on obtient :

Si on tient compte, dans le cas de la motrice, de la valeur spéciale de l'équipement électrique, le bénéfice sur trente ans ressort à 296.900 francs.

	Poids de la voiture acier	Allègement	Al employé.	Coût de l'allègement	Bénéfice (1) sur 30 ans	Valeur de récupération	Bénéfice total.
				Fr.	Fr.	Fr.	Fr.
Voiture banlieue 75.000 km. an.	30 T.	6 T.	4 T.	65.000	+ 29.900	24.000	53.900
Motrice 75.000 km. an	49 T.	8 T.	4 T.	62.000	+ 187.300	24.000	211.300
Grand parcours 150.000 km. an.	40 T.	10 T.	6 T. 5	105.250	- 31.200	39.000	7.800

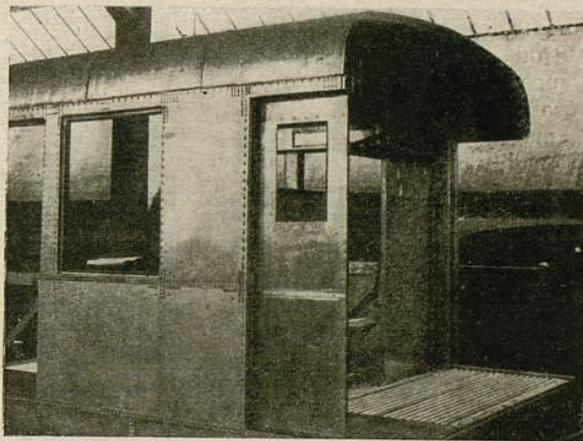
(1) Ce prix a été choisi volontairement extrêmement bas ; le prix des déchets de duralumin est actuellement de Frs 10 environ.

ce qui donne un bénéfice total de 330.000 francs, soit environ 60 % du prix de la voiture.

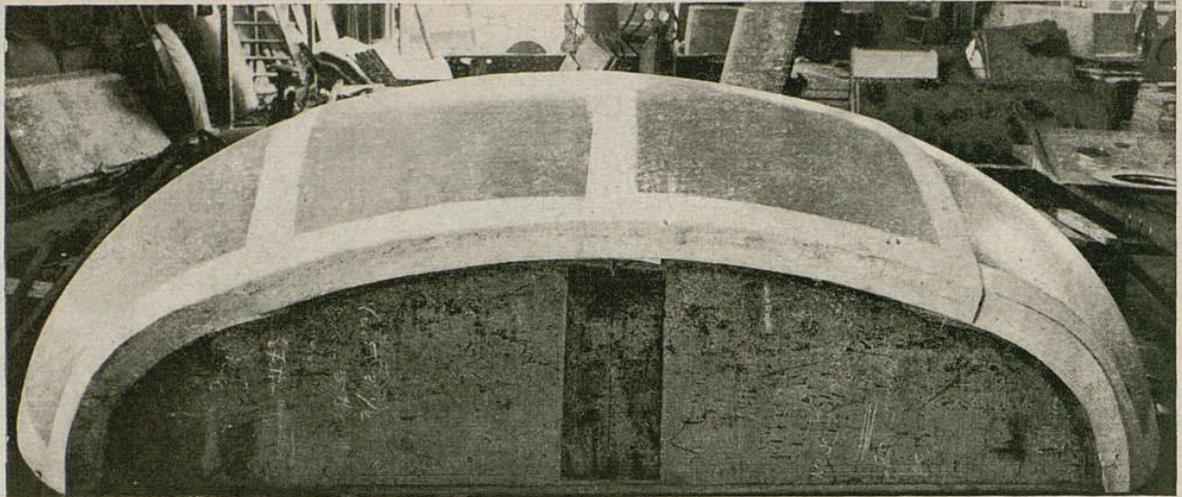
Les cas qui viennent d'être étudiés ne sont pas les plus favorables aux alliages légers, car ils ne portent que sur une introduction partielle de ces alliages. Si on chiffre par exemple le bénéfice total que permet de réaliser la voiture de la *Metallgesellschaft*, on trouve une somme de 881.000 francs, sans faire intervenir la valeur spéciale de l'équipement électrique.

On n'a tenu compte jusqu'à présent que de l'économie d'énergie procurée par l'allègement. Il existe d'autres économies, telles que celle pouvant être

1. Ce prix suppose un emploi déjà étendu du duralumin dans les Chemins de fer, c'est-à-dire une fabrication en grande série.



Voiture de la *Metallgesellschaft* en construction.



Chaudronnage de tôles de duralumin aux Ateliers des Entreprises Industrielles Charentaises d'Aytré pour les toitures de wagons de la Compagnie des Wagons-Lits.

réalisée pour le freinage. Sur les parcours où les arrêts sont fréquents (le Métropolitain par exemple qui consomme par usure des sabots de frein près de 10 tonnes de fonte par kilomètre de voie et par an), cette économie viendrait s'ajouter à celle qu'on obtiendrait par une moindre usure des bandages, des coussinets, des rails et sur la main-d'œuvre correspondant au travail de remplacement des sabots de frein.

Bénéfices résultant des avantages indirects procurés par l'allègement

1° Etant donné une locomotive d'une puissance donnée, il sera possible de lui faire remorquer un nombre plus grand de voitures. Avec des allègements de 10 % ou 20 % on gagne une voiture pour 10 ou 5 voitures. Il en résulte en outre une meilleure utilisation du matériel et du personnel. Si on évalue d'une part les dépenses de premier établissement (achat de locomotives avec tender, construction de dépôts, alimentation en eau et charbon...) et d'autre part les dépenses d'exploitation (traction du poids mort de la locomotive et du tender, entretien des locomotives...) on obtient les résultats suivants :

a) Grands parcours :

Bénéfice en trente ans par le gain d'une voiture avec cinq voitures légères : 626.200 francs par voiture.

Bénéfice sur trente ans par le gain de deux voitures avec neuf voitures légères : 701.000 francs par voiture.

b) Moyens parcours :

Bénéfice en trente ans par le gain d'une voiture avec cinq voitures légères : 447.000 francs par voiture.

Bénéfice en trente ans par le gain de trois voitures avec neuf voitures légères : 529.000 francs par voiture.

Ces chiffres sont de l'ordre du prix d'achat d'une voiture.

2° On peut avoir à augmenter le nombre de voitures tout en conservant des machines d'un type ancien. Si on tient compte des bénéfices de premier établissement et d'exploitation, on trouve que le bénéfice de l'opération est par voiture :

Pour les grands parcours : 533.000 fr.

Pour les parcours moyens : 366.000 fr.

3° L'allègement des voitures permettra encore de réduire l'effectif des locomotives, d'où une économie sur les frais de premier établissement, l'entretien du matériel et de la voie, et le personnel ou bien d'éviter le doublement de lignes à grand trafic. Dans ce cas, le bénéfice obtenu par voiture est de 684.000 francs en trente ans;

4° Dans le cas de la traction électrique l'allègement de toutes les voitures d'un train a sa répercussion sur la puissance de l'usine génératrice. L'économie totale ressort alors à 652.000 francs par voiture en trente ans.

CONCLUSION

On voit par cette étude que le remplacement des voitures d'acier par des voitures allégées au moyen des alliages d'aluminium offre des avantages économiques certains. Les économies que nous avons chiffrées ne doivent pas être prises en valeur absolue, étant donnée l'imprécision de certaines bases de départ. Mais les marges qu'on s'est réservées permettent de les considérer comme des ordres de grandeur tout à fait raisonnables. Sans doute l'expérience n'a pu encore sanctionner les résultats qu'on est en droit d'attendre parce que l'état de la métallurgie des alliages légers ne permettait pas jusqu'à ces dernières années d'aborder le problème de la construction du matériel roulant. La confiance qu'on peut avoir aujourd'hui dans la valeur de ces matériaux et les possibilités qu'ils offrent permettent de résoudre avec une parfaite sécurité le problème de la réalisation de voitures métalliques entièrement construites en duralumin.

Quelques réalisations

Parmi les principales et les plus récentes réalisations on peut citer :

En France :

1° La Compagnie des Chemins de Fer du Nord a, dès 1924, utilisé les alliages légers dans des voitures décrites dans la Revue (n° 6, 1925) et elle sort actuellement de nouvelles voitures à parois intérieures en duralumin.

2° La Compagnie des Wagons-Lits a mis en service en 1929 de nouvelles voitures pour le « train bleu » dans lesquelles la toiture est en tôle de duralumin de 1^{mm}5 d'épaisseur. Ces tôles sont rivées sur des arceaux au moyen de rivets de 6×24 espacés de 60 millimètres. On a placé un couvercle joint de 40×5 et l'étanchéité a été obtenue par interposition de serpillère enduite de céruse;

3° La Compagnie des Chemins de Fer de l'Etat a actuellement en construction 300 voitures pour grande banlieue dans lesquelles se trouveront réalisés en duralumin : la toiture, le jet d'eau, les cloisons intérieures, les encadrements de baie, les cadres de glace, le panneau intérieur, les supports de banquettes, les barres d'appui, les loqueteaux. Avec le plafond en aluminium, les moulures, les pièces en alliages coulés, on obtiendra un allè-

gement d'environ 2 t. 20 pour une utilisation d'environ 1 t. 4 de métaux légers. La Compagnie des Chemins de Fer du P. O. fait également construire des voitures métalliques avec toitures en duralumin.

A l'étranger :

En Allemagne, la *Metallgesellschaft* fait construire pour le Chemin de Fer de ceinture de Berlin des automotrices de 18 mètres de long, à deux bogies, entièrement en alliage léger à l'exception des essieux montés, des sabots de frein, des engrenages, des ressorts, des attelages. L'allègement ainsi obtenu est de 19 tonnes.

Il existe sur une ligne des Chemins de Fer du Hartz une automotrice entièrement construite en alliages légers pesant 10 tonnes. Cette construction a donné un allègement de 50 % ; elle a permis l'utilisation d'un moteur semi-diesel d'une puissance maxima de 100 CV et procure une économie dépassant 35 % des dépenses d'exploitation.

En Amérique, la Pennsylvania Railroad a mis en service, en 1927, 8 voitures dont la caisse est presque entièrement en alliages légers. Elle est très satisfaite de cet essai et quand elle est obligée de changer la caisse d'une voiture d'un modèle analogue, elle la remplace par la nouvelle caisse en alliage léger.

L'Illinois Railroad, qui a actuellement en service 140 voitures partiellement en alliage léger, a visité récemment celles qui roulent depuis 1924 : on n'a point trouvé de corrosion ; quelques rivets à tête fraisée étaient tombés dans les portes.

La North Western Railroad a depuis 1927 quelques voitures en service contenant 1.500 à 2.000 kg d'alliages légers par voiture : elle en est très contente et en a commandé 120 autres.

Signalons encore l'emploi du duralumin pour la fabrication de bielles de locomotives. Quatre locomotives ainsi équipées sont en service aux Etats-Unis : elles ont actuellement 7.000 à 10.000 heures de marche et ont donné entière satisfaction. Elles ont permis de réduire les effets dus à la force centrifuge et au mouvement alternatif, on a constaté en particulier que l'usure des coussinets était trois fois moins grande qu'avec les bielles d'acier.

A. DE BIRAN et A. DUMAS.