

# Le matériel roulant léger des Chemins de fer fédéraux

Autor(en): **Guignard, R.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **73 (1947)**

Heft 14-15

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-55141>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Le matériel roulant léger des Chemins de fer fédéraux

par R. GUIGNARD, ingénieur C.F.F.

Vers 1934, les Chemins de fer fédéraux mirent à l'étude, sur la base des expériences faites à l'étranger, la construction de nouveaux véhicules moteurs et remorqués, afin de parer dans une certaine mesure aux effets de la crise économique qui se manifestaient, depuis 1930, par une diminution constante du trafic. De plus, ces nouveaux matériels devaient leur fournir les moyens techniques indispensables pour lutter efficacement contre la concurrence de l'automobile en leur permettant de multiplier les possibilités de voyages et de diminuer les temps de parcours sans qu'il en résultât pour autant une augmentation trop sensible des frais d'exploitation. A cet effet, il fallait donc construire du matériel léger capable de circuler à des vitesses plus élevées, aussi bien en alignement que dans les courbes, et consommant moins d'énergie. L'année 1935 marque le début de l'allègement général et progressif du matériel roulant, rendu possible par l'application de nouveaux principes de construction découlant de l'emploi de plus en plus étendu de la soudure électrique et des alliages légers. Ajoutons encore que les réductions de poids obtenues n'ont en aucune manière porté atteinte à la sécurité et au confort des voyageurs.

Nous nous proposons, dans cette note, d'examiner successivement les divers types de matériels légers mis en service sur le réseau électrifié des C. F. F. au cours de ces douze dernières années. Après avoir retracé sommairement l'évolution des véhicules moteurs depuis les premières flèches rouges jusqu'aux locomotives légères et rapides, et donné quelques renseignements sur le freinage des trains à vitesse élevée, nous étudierons le mode de construction des voitures légères en acier et en alliages légers. Nous terminerons cet exposé par quelques considérations générales sur les avantages économiques de l'allègement.

## Véhicules moteurs électriques.

Le tableau I donne les caractéristiques principales des véhicules moteurs électriques et met nettement en évidence les progrès accomplis au cours de ces douze années dans le domaine de la traction électrique légère. On remarquera la diversité des types de véhicules qui ont précédé la locomotive rapide  $Re^{4/4}$ . Cette diversité s'explique cependant par le

fait que, pendant les années d'avant-guerre, les idées relatives au futur développement du trafic accéléré des voyageurs étaient en pleine évolution. Il s'agissait donc de faire des expériences pour déterminer le genre de véhicule moteur le plus apte à réaliser dans des conditions économiques et financières acceptables les améliorations qu'on désirait apporter à l'horaire.

La lettre R désigne les véhicules moteurs rapides dont la construction satisfait aux conditions spéciales suivantes :

1. Vitesse maximum supérieure à 110 km/h.
2. Frein rapide, exerçant aux grandes vitesses une plus grande pression sur les sabots de frein, de manière à maintenir les chemins de freinage dans les limites prescrites.
3. Charge par essieu plus petite ou égale à 14 t, pour pouvoir franchir les courbes piquetées et munies de courbes de raccordement à des vitesses supérieures de 10 km/h à celles des trains ordinaires.

Cette dernière condition détermine à elle seule le choix du type de véhicule, notamment en ce qui concerne la disposition des essieux. En effet, pour qu'un véhicule puisse circuler dans les courbes à des vitesses élevées, il faut que la pression latérale exercée sur le rail extérieur par le boudin des roues et résultant de la force centrifuge ne soit pas trop élevée. Cette pression dépend non seulement du poids et de la vitesse, mais aussi de la disposition des essieux. Sur une locomotive munie d'un châssis, dans lequel les paliers sont guidés, certains essieux peuvent se déplacer latéralement, afin de faciliter l'inscription en courbe. De ce fait, ils échappent à la transmission de la force centrifuge sur le rail. Il en résulte une répartition inégale de la pression latérale, les essieux sans jeu étant plus chargés que les autres. Au contraire, les pressions du boudin des véhicules à quatre essieux sur bogies se répartissent d'une manière assez égale sur toutes les roues. En conséquence, seuls les véhicules à deux bogies à deux essieux sont aptes à circuler en courbe aux vitesses élevées, à condition que la charge par essieu ne dépasse pas une certaine limite. Actuellement, cette limite est fixée à 14 t, mais il n'est pas exclu qu'elle puisse être dépassée grâce à une construction judicieuse des organes de roulement.

Les premiers véhicules moteurs rapides et légers, satisfaisant aux trois conditions ci-dessus, furent deux automotrices de la série  $RCe^{2/4}$ , bien connues sous le nom de « flèche rouge ». Le fait qu'elles étaient conçues pour circuler isolément offrait plus d'un avantage au point de vue de leur construction. Il devenait possible d'abandonner les lourds appareils de choc et de traction et de construire très légèrement la caisse et les bogies, les efforts de traction ou de freinage

TABLEAU I. Caractéristiques principales des véhicules moteurs électriques.

Désignation	Nombre	Année de mise en service	Poids en service t	Nombre de places total	Puissance uni-horaire à la jante	Vitesse correspondante km/h	Vit. max. km/h	Diamètre des roues motrices mm	Rapport de réduction	Longueur totale m	Poids unitaires	
											Kg/CV.	Kg/place
Automotrices rapides $RCe^{2/4}$	7	1935-38	35	70	536	102	125	900	1 : 2,95	22,40	65,3	500
Automotrice $Ce^{2/4}$ Flèche du Jura . . . . .	1	1938	44,4	71	600	68,5	110	900	1 : 3,85	22,62	74,0	626
Train automoteur rapide $RBCFe^{8/12}$ . . . . .	1	1937	127	222	2280	115,5	150	900	1 : 2,64	68,70	55,7	572
Train automoteur rapide $RCBFe^{4/8}$ . . . . .	1	1941	82	140	1140	16	125	900	1 : 3,17	46,60	72,0	586
Automotrice jumelée rapide $RBe^{4/8}$ . . . . .	1	1939	93	134	1140	115,5	150	900	1 : 2,64	46,20	81,6	694
Fourgons automoteurs rapides $RFe^{4/4}$ . . . . .	3	1940	47	—	1300	91	125	900	1 : 3,17	15,80	36,1	—
Locomotives rapides $Re^{4/4}$	16	1946-47	56	—	2450	82,5	125	1040	1 : 2,85	14,70	22,9	—

à transmettre étant très minimes. Quant à l'installation motrice, elle devait être juste assez forte pour mouvoir la seule automotrice. On obtenait ainsi un véhicule pesant seulement 32,6 t à vide et pouvant transporter 70 voyageurs assis et 30 debout. Avec un poids mort de 465 kg par place assise, l'allègement était d'environ 60 % par rapport aux automotrices lourdes construites de 1925 à 1927 et de capacité égale. Ainsi, pour la première fois en Suisse, le maximum de vitesse de 100 km/h était dépassé et porté à 125 km/h. Il était donc prouvé qu'un véhicule léger judicieusement construit pouvait avoir une allure satisfaisante et offrir toute garantie contre les risques de déraillement, contrairement à la croyance universelle que seuls les véhicules lourds possédaient ces avantages. Cependant, les inconvénients dus à l'impossibilité d'ajouter des remorques aux flèches rouges, ne tardèrent pas à apparaître dans le service régulier. Comme il fallait souvent remplacer ces dernières par une locomotive et quelques voitures, on les affecta aux voyages en société. Là elles rendirent de précieux services, ce qui décida les C. F. F. à faire encore l'acquisition de cinq de ces automotrices. Pendant la guerre, la pénurie de locomotives imposa la transformation des flèches rouges pour leur permettre de remorquer un ou deux véhicules et augmenter ainsi leurs possibilités d'utilisation sur les lignes peu fréquentées. Cette transformation, qui ne fut pas chose facile, a nécessité notamment le renforcement des extrémités du châssis pour le montage des appareils de choc et de traction et la pose du frein automatique. L'automotrice transformée pèse environ 35 t. Elle peut remorquer une charge maximum de 30 t sur les lignes d'une déclivité inférieure à 12 ‰. Des voitures spéciales très légères, dont nous parlerons plus loin, comportant un compartiment pour les bagages et 48 places assises, vont être mises prochainement en service comme remorques des flèches rouges.

Les deux paires de trains légers, dont la charge était limitée à 150 t, mis en circulation dès le 15 mai 1936 sur la ligne Genève-Zurich, connurent d'emblée un grand succès et démontrèrent les possibilités de la traction électrique légère. Ils étaient formés de 3 voitures en acier du type lourd et d'un fourgon à trois essieux remorqués par une locomotive de la série Ae<sup>3/6</sup>, dont la suspension fut modifiée pour pouvoir porter la vitesse maximum à 110 km/h et élever de 5 km/h la vitesse dans les courbes. Le succès de ces trains décida les C. F. F. à commander, en 1937, deux trains automoteurs rapides de la série RBCFe<sup>8/12</sup> pour assurer dans de meilleures conditions de confort et de vitesse les relations nouvellement créées. Ce genre de train est formé de trois voitures, inséparables en service, reposant chacune sur deux bogies; les voitures extrêmes, aux formes aérodynamiques très poussées, sont motrices. Les caractéristiques en sont une grande puissance et une vitesse maximum de 150 km/h. Ces trains se révélèrent d'une capacité trop faible pour remplacer les trains légers, toujours plus fréquentés, et furent alors affectés à de nouvelles relations rapides entre Rorschach et Berne, ainsi qu'à des voyages d'excursion. L'un de ces trains, gravement endommagé par l'incendie du dépôt de Rorschach, fut reconstruit en 1941 comme automotrice double RBCFe<sup>4/8</sup>.

Les expériences faites avec les automotrices simples ou multiples démontrèrent que ce genre de véhicule ne répondait pas aux besoins du service des voyageurs caractérisé, en Suisse, par des pointes fréquentes et souvent inattendues. Vu les excellents résultats obtenus avec les voitures légères en acier, dont les premières unités furent mises en service en 1937, on décida de construire une locomotive légère capable de remorquer des trains formés de ce nouveau matériel aux

mêmes vitesses que celles des automotrices rapides. C'est ainsi qu'apparurent en 1940, à titre d'essai, les 3 fourgons automoteurs rapides de la série RFe<sup>4/4</sup>. Leur effort de traction relativement faible, notamment aux vitesses élevées, ne leur permettait pas de remorquer plus de 3 ou 4 voitures légères en acier dans les mêmes temps de parcours que les automotrices rapides. Cependant, comme ils étaient munis de la commande multiple, on pouvait former un train navette ayant un fourgon à chaque extrémité, les deux véhicules étant desservis par un seul mécanicien. Mais depuis le début de la guerre, le nombre de voyageurs utilisant les trains directs légers augmenta sans discontinuer, de sorte que la composition de ces trains atteignait, dans bien des cas, plus de 10 voitures. On dépassait ainsi les possibilités de traction de deux fourgons automoteurs. En outre, l'aménagement du compartiment à bagages dans le véhicule moteur ne se révéla pas une solution très heureuse tant pour l'exploitation que pour le service d'entretien, rendu plus difficile par une mauvaise accessibilité de l'appareillage électrique. Pour ces raisons, les C. F. F. étudièrent alors, en étroite collaboration avec les constructeurs, une nouvelle locomotive légère dont la puissance devait être environ le double de celle des fourgons automoteurs. La première unité de cette nouvelle série (Re<sup>4/4</sup>) est sortie de fabrique au début de 1946. Nous ne reviendrons pas ici sur les innovations que présente ce nouveau type de locomotive, vu qu'elles ont déjà fait l'objet d'un article dans le *Bulletin technique*<sup>1</sup>. Nous dirons simplement que cette locomotive a été spécialement conçue pour circuler aux vitesses élevées. En effet, l'effort de traction à la jante des roues motrices est de 8040 kg à la vitesse correspondant au régime horaire (82,5 km/h) et de 4000 kg à la vitesse maximum. Ajoutons que le poids par unité de puissance est environ la moitié de celui des locomotives Ae<sup>3/6</sup>, mises en service de 1925 à 1929, qui ont remorqué pendant plus de dix ans les trains légers sur les lignes du Plateau. Pour faciliter l'inscription en courbe et diminuer l'usure des boudins, les deux bogies sont reliés entre eux par un accouplement élastique transversal devant conjuguier leurs mouvements.

#### Le problème du freinage.

La marche des trains à plus de 100 km/h pose également le problème des chemins de freinage, qui augmentent en fonction de la vitesse, sans pouvoir cependant dépasser certains limites imposées par les signaux.

De nombreux essais ont prouvé que le coefficient de frottement des sabots de frein en fonte sur les bandages en acier est fonction à la fois de la vitesse et de la pression spécifique sur les sabots. A vitesse constante, il est d'autant plus grand que la pression spécifique est plus faible, et, à pression constante, il est d'autant plus grand que la vitesse est plus faible. D'autre part, il est pratiquement indépendant de la température des sabots. Pour diminuer le chemin de freinage aux vitesses élevées, il est donc nécessaire d'augmenter la pression totale sur les sabots, à condition de la ramener à sa valeur normale quand la vitesse est tombée à environ 50 km/h afin d'éviter le blocage des roues. Sur les automotrices rapides, qui circulent isolément, on obtient un effort de freinage plus élevé en choisissant simplement une pression plus grande dans les cylindres de frein. Dans ce cas, il incombe au mécanicien de réduire cette pression, par une manœuvre adéquate du robinet de mécanicien, dès que la vitesse a été suffisamment réduite. Sur les premiers trains directs légers, on se tira provi-

<sup>1</sup> *Bulletin technique de la Suisse romande*, n° 10/1946, pages 135-136 : « Nouvelles locomotives pour trains directs des Chemins de fer fédéraux ».

soirement d'affaire en portant la pression dans la conduite générale du frein automatique de 5 à 6 kg/cm<sup>2</sup>, ce qui augmentait la pression dans les cylindres de frein. Là encore, le mécanicien devait réduire, de son propre chef, l'effort de freinage aux faibles vitesses.

Les voitures légères en acier ont été munies du frein rapide, appelé frein R, qui se compose du frein automatique Westinghouse normal et d'un frein additionnel identique au premier, dont la dépendance de la vitesse est assurée automatiquement par une valve électro-pneumatique commandée par un interrupteur centrifuge placé en bout d'arbre de la dynamo d'éclairage. Le frein additionnel entre en action lors d'un freinage aux vitesses supérieures à 80 km/h et donne sur les sabots, avec le frein normal, un effort de freinage total de 140 % de la tare du véhicule. Il est mis hors service dès que la vitesse tombe à 40 km/h; la pression sur les sabots est alors ramenée à sa valeur normale, soit 70 % de la tare.

L'installation du frein rapide sur les locomotives est plus simple, du fait que l'on dispose d'air comprimé à la pression de 8 kg/cm<sup>2</sup>. Le deuxième cylindre de frein n'est pas nécessaire. La valve électro-pneumatique commande un transformateur de pression, qui a pour fonction d'élever la pression dans le cylindre de frein de 3,5 à 6,5 kg/cm<sup>2</sup>. Deux contacts placés dans l'indicateur de vitesse et le circuit de commande de la valve électro-pneumatique assurent le fonctionnement automatique du dispositif en fonction de la vitesse.

Le frein R a permis de réduire d'environ 25 % les chemins de freinage à la vitesse de 110 km/h. Lors de la mise en service des premières locomotives Re <sup>4</sup>/<sub>4</sub>, les C. F. F. ont exécuté toute une série d'essais de freinage, qui ont montré qu'à la vitesse de 125 km/h un train de 350 t, locomotive comprise, pouvait être arrêté sur une distance de 700 m en palier et 800 m en pente de 12 ‰. Comme les trains rapides doivent pouvoir circuler à la vitesse maximum de 125 km/h sur les pentes jusqu'à 10 ‰, il est donc devenu nécessaire de réduire encore les chemins de freinage en portant l'effort sur les sabots à 160 % de la tare. Aux essais, on a obtenu avec ce freinage

renforcé des distances d'arrêt de l'ordre de 600 m en palier et 700 m en pente de 12 ‰. Il sera donc possible de faire circuler les trains rapides remorqués par des locomotives Re <sup>4</sup>/<sub>4</sub> à des vitesses plus élevées qu'actuellement dans des conditions de sécurité absolue.

### Matériel voyageurs.

Les premières voitures entièrement métalliques, mises en service en 1926, avaient pour principal avantage d'offrir une plus grande sécurité aux voyageurs en cas d'accident. Cependant, cet avantage se payait par un alourdissement sensible du matériel, qui avait pour conséquence une augmentation des frais de traction. La substitution de la soudure électrique aux rivures, puis l'utilisation partielle des alliages légers pour certains éléments de l'aménagement intérieur permirent d'obtenir quelques allègements. C'est ainsi, par exemple, que la tare des voitures AB<sup>4ü</sup> à couloir latéral, qui avait atteint le maximum de 46 t en 1933, se réduisait à 40 t en 1936, ce qui représente un allègement de 13 %. Il apparaissait dès lors que de nouvelles réductions importantes de la tare ne pourraient être obtenues qu'au moyen de la construction tubulaire, dont les premières applications étaient faites en France.

Nous allons passer rapidement en revue les trois types de voitures légères figurant dans le tableau II.

#### Voitures légères en acier

C'est en 1933 que les C. F. F. confièrent l'étude, d'après le principe de la poutre tubulaire, d'une nouvelle voiture allégée systématiquement dans toutes ses parties, à la fabrique suisse de wagons et d'ascenseurs S. A. à Schlieren. Cette voiture devait offrir plus de confort, plus de sécurité et un roulement plus doux, surtout aux grandes vitesses. De plus on voulait qu'elle puisse servir aussi bien dans les trains directs que dans les omnibus, et cela en commun avec les voitures normales. Les ateliers de Schlieren construisirent d'abord un prototype, dont l'ossature du châssis-caisse fut

TABLEAU II. Caractéristiques principales des voitures légères.

Désignation	Série	Nombre	Nombre de places assises				Tare moy. t	Poids unitaires en kg.		Longueur totale m	Distance entre les pivots m	Largeur de la caisse m	Hauteur totale m	Niveau du plancher mm	Bogies		
			1 <sup>re</sup>	2 <sup>e</sup>	3 <sup>e</sup>	tot.		par place	par m						Ecartement m	Diam. roues mm	
Voitures légères en acier	couloir central	B <sup>4ü</sup>	23	—	48	—	48	28,3	590	1250	22,70	16,77	2,92	3,70	1000	2,70	900
		BC <sup>4ü</sup>	15	—	24	31	55	28,3	515	1250							
		C <sup>4ü</sup>	70	—	—	72	72	27,5	382	1210							
	couloir latéral	AB <sup>4ü</sup>	8	12	30	—	42	28,8	685	1270	22,70	16,40	2,92	3,75	1100	2,70	900
		C <sup>4ü</sup>	1	—	—	72	72	29,0	405	1280							
	buffet wagon-rest.	C <sup>4ü</sup>	5	—	—	52	52	29,5	568	1300	22,70	17,00	2,92	3,70	1000	2,70	900
		D <sup>4ü</sup>	10	—	—	52	52	32,4	625	1430							
	fourgons	F <sup>4ü</sup>	39	37 m <sup>2</sup>		15 t		22,2	—	1205	18,40	12,70	2,92	3,74	1210	2,70	900
		FZ <sup>4ü</sup>	8	19,5 m <sup>2</sup>		12 t		24,5	—	1200							
	Voitures légères de la ligne du Brunig	AB <sup>4ü</sup>	3	11	23	—	34	14,0	412	850	16,47	11,80	2,655	3,40	872	1,80	700
B <sup>4ü</sup>		2	—	34	—	34	13,5	397	820								
BC <sup>4ü</sup>		4	—	23	28	51	13,2	216	800								
C <sup>4ü</sup>		18	—	—	68	68	12,6	187	765								
Voitures légères de lignes secondaires	BCF <sup>4</sup>	5	—	16	32	48	22	458	1015	21,70	15,60	2,95	3,70	1193	2,30	900	
	BC <sup>4</sup>	3	—	24	32	56	21	375	1140								
	C <sup>4</sup>	3	—	—	64	64	20	313	1085								

soumise, en 1934, à des essais de charges statiques destinés à vérifier expérimentalement les calculs de résistance et à fournir les bases d'une construction pouvant être exécutée en série. On appliqua une charge verticale de 15 t (200 voyageurs), uniformément répartie sur toute la longueur et une charge horizontale de 100 t sur les tampons. Les presses hydrauliques à disposition ne permirent pas d'augmenter cette dernière jusqu'à la valeur de 200 t prescrite pour les calculs. Les tensions et les déformations des tôles de revêtement et des membrures principales furent mesurées dans les endroits les plus critiques, ainsi que les flèches de la poutre-caisse. Dans l'ensemble, ces essais donnèrent entière satisfaction et l'on passa une première commande de 8 voitures, qui furent mises en service en 1937 dans deux compositions de trains rapides légers sur la ligne Genève-Zurich. La tare du prototype de troisième classe s'élevait à 25 t seulement pour 72 places assises, d'où un allègement de 34 % par rapport à la voiture du type lourd en acier, dont la tare était de 38 t en 1933. Le poids des voitures construites en série s'élevait à 27,1 t pour les C<sup>411</sup> et 27,8 t pour les B<sup>411</sup> en raison des améliorations et simplifications de fabrication apportées à la suite des essais de charge. L'allègement était ainsi respectivement de 28 et 32 %. Remarquons que cette grande diminution de poids était obtenue malgré un accroissement de la longueur totale de 2 m 30 résultant de l'augmentation du confort des voyageurs. Le poids par unité de longueur passait ainsi pour la voiture de deuxième classe de 2200 à 1220 kg/m, ce qui équivalait à une diminution de 39 %.

Ces voitures se distinguent extérieurement par leur forme élégante et aérodynamique et leurs extrémités légèrement fuselées. Les portes d'accès ont été reportées vers le milieu de la voiture, afin de pouvoir placer les bogies le plus près possible des extrémités, ce qui améliore notablement l'allure dans les courbes. Cette disposition a encore permis de diviser la voiture en trois compartiments, auxquels on accède directement depuis les deux plates-formes spacieuses, et d'abaisser le niveau du plancher du compartiment central à 1 m au-dessus du rail. Les deux cabinets de toilette se trouvent aux extrémités. Dans les compartiments extrêmes, le niveau du plancher s'élève par deux rampes de 10 cm chacune pour permettre la communication avec les voitures normales. La hauteur totale de la voiture a diminué d'environ 30 cm.

Les voitures-buffet ne diffèrent des voitures de troisième classe que par le compartiment central aménagé pour la cuisine, l'office et la salle à manger de 20 places. Les wagons-restaurant légers en acier ont remplacé peu à peu, à partir de 1944, ces voitures devenues insuffisantes dans les trains légers en raison du nombre toujours plus grand de voyageurs qui désirent prendre des repas complets. Tous les appareils de la cuisine et la grande armoire frigorifique fonctionnent à l'électricité, le courant étant fourni par l'intermédiaire de deux transformateurs, soit par la conduite du chauffage, soit par la ligne de contact à l'aide d'un archet du type léger, placé sur le toit. La tare est de 32,4 t, alors que celle des derniers types de la C<sup>1e</sup> des wagons-restaurant, construits en 1930, s'élève à 48 t pour le même nombre de places. Il en résulte un allègement considérable (32 %), malgré une augmentation de la longueur totale de 2 m 30.

En 1944, les deux premières voitures à couloir latéral des séries AB<sup>411</sup> et C<sup>411</sup> étudiées et construites par la Société Industrielle Suisse à Neuhausen furent mises en service. Elles sont destinées à satisfaire les besoins futurs du trafic international. Par rapport aux constructions déjà quelque peu allégées de l'époque 1936-1938, l'allègement obtenu est de 28 %, bien qu'on ait augmenté la longueur totale de

1 m 30, tout en conservant le même nombre de places.

Les fourgons à bagages et les fourgons-poste sont construits selon les mêmes méthodes que les voitures légères en acier. Leur tare a pu être réduite de 10 t environ.

L'ossature du châssis-caisse de tous ces matériels est reproduite à la fig. 1, qui donne une coupe transversale et quelques coupes longitudinales partielles d'une voiture de troisième classe à couloir central. Dans cette construction, les trois éléments principaux : châssis, parois latérales et toiture sont liés entre eux de manière à former un tout homogène. L'enveloppe extérieure du tube est constituée par les tôles de revêtement du plancher, des faces et du toit, qui forment une section se rapprochant sensiblement d'un carré aux angles arrondis ; le tube est fretté intérieurement par une série d'anneaux transversaux complets et continus, situés entre deux baies et formés chacun par une traverse de châssis, un montant et une courbe de pavillon. Ces anneaux prennent appui, d'une part, sur les longerons extérieurs du châssis et, d'autre part, sur les battants de pavillon. Des renforcements ont pour but de diminuer la surface libre des tôles, donc le danger de voilement, et la longueur de flambage de toutes les membrures. Enfin, le tube est fermé à ses extrémités par des parois puissantes appuyées tant au châssis qu'au pavillon sur des systèmes caissonnés capables d'absorber élastiquement un travail important. L'ensemble châssis-caisse ainsi établi assure la plus grande résistance, avec le poids minimum de matière, aux charges verticales normales (flexion) et aux efforts accidentels de bout (compression) en utilisant le moment d'inertie maximum qui résulte de la constitution entièrement tubulaire de la poutre, la plus voisine d'un tube de section circulaire, forme idéale de résistance. C'est dans la toiture que les renforcements sont les plus importants, en raison de la très faible épaisseur de la tôle, qui est de 1,5 mm et par le fait qu'il s'agit de la partie comprimée de la poutre-caisse en flexion. De plus, le toit est soumis à l'action intense des rayons solaires en été et au froid en hiver, de sorte que les variations de température dans cette partie sont particulièrement élevées. Nous trouvons d'abord une série de courbes de pavillon supplémentaires situées au-dessus des baies. Puis, entre le toit proprement dit et le battant de pavillon, une tôle de 2,5 mm soudée bout à bout avec la tôle du toit sur un fer en T qui sert de renfort longitudinal. Le châssis-caisse est entièrement soudé à l'arc électrique et exécuté en acier doux ordinaire de 37 à 42 kg/mm<sup>2</sup> de résistance à la rupture. Cet acier a été choisi à cause de ses bonnes qualités de soudabilité et de son prix très abordable. Pour obtenir une bonne isolation thermique et phonique, toutes les faces intérieures des tôles de revêtement sont recouvertes d'une couche isolante (mélange d'amiante avec un adhésif spécial) de 12 à 15 mm d'épaisseur appliquée au pistolet. Pour empêcher la corrosion, on a employé, avant la guerre, pour les faces et le toit, des tôles d'acier au cuivre contenant 0,4 % de ce métal. De plus, les longerons extérieurs sont munis dans leur partie la plus basse, de larges ouvertures qui assurent une évacuation complète des eaux de pluie et de condensation.

L'ossature du châssis-caisse des voitures à couloir central pèse 9,3 t et celle des voitures à couloir latéral 11,0 t, ce qui représente un allègement de 20, respectivement 17 % par rapport à celle des voitures en acier du type lourd.

Les voitures à couloir central, les wagons-restaurant et les fourgons sont munis d'un bogie très allégé (fig. 3). L'essieu monté est du type « Uerdingen » avec essieu creux forgé en acier de 70 à 80 kg/mm<sup>2</sup> et roues monobloc de 900 mm de diamètre à voile mince à ondulations radiales. Son poids

est de 685 kg, contre 1250 kg pour l'essieu monté du type normal. Afin de supprimer les chauffages de coussinets, de réduire les frais d'entretien et de diminuer la résistance au roulement, on a adopté des boîtes d'essieux avec roulements pivotants à rouleaux. La suspension primaire (essieux/châssis) est assurée par des ressorts hélicoïdaux placés de chaque côté de la boîte. Les chocs reçus par l'essieu sont amortis par des plaques en caoutchouc placées sous les ressorts et par un amortisseur à huile système SWS (fig. 4), qui assure en même temps le guidage de l'essieu dans le sens longitudinal. Le châssis et la traverse danseuse sont formés de tôles d'acier doux assemblées par la soudure électrique. Le poids total de la caisse est transmis au châssis par une crapaudine, la traverse danseuse et deux grands ressorts à lames longitudinaux suspendus par des bielles inclinées donnant un effort de centrage. Les mouvements latéraux de la traverse danseuse et, par suite, de la caisse sont fortement atténués par un amortisseur Broulhiet. Comme il existe un écart sensible entre le poids de la voiture vide et chargée, on a dû installer deux ressorts à lames additionnels, qui entrent en action dès que la charge utile atteint 4500 kg (60 voyageurs). De ce fait, la suspension reste très douce aussi bien aux faibles qu'aux fortes charges. Le poids du bogie complet s'élève à 3550 kg, d'où un allègement d'environ 40 %.

Les voitures à couloir latéral sont pourvues d'un bogie de construction spéciale, dans laquelle les ressorts à lames et hélicoïdaux sont remplacés par une élégante suspension à barres de torsion (fig. 4). La caisse repose sur deux appuis latéraux reliés par des leviers à un premier jeu de barres de torsion placées à l'intérieur du châssis et solidement ancrées aux traverses frontales de celui-ci. Le châssis, qui tient lieu de traverse danseuse, est suspendu aux boîtes d'essieux par des bielles fixées aux barres de torsion visibles à l'extérieur du bogie. Le pivot central, qui n'a que des efforts horizontaux de guidage et de freinage à transmettre, est placé aussi bas que possible, afin d'améliorer le roulement. Le poids du bogie complet est de 3630 kg, ce qui représente un allègement de 2000 kg environ ou 36 %. Ce nouveau bogie (Brevet SIG) donne à la voiture une allure remarquablement douce. Il a cependant fallu atténuer les oscillations latérales de la caisse, qui prennent selon l'état de la voie une grande amplitude, en installant un amortisseur à huile Broulhiet sur chacune des deux barres de torsion de la caisse.

Comme il ressort du tableau II, le nombre de véhicules légers en acier construits pour le compte des C. F. F. par les deux constructeurs (SWS et SIG) s'élevait, à fin 1946, au total à 179 unités, savoir : 117 voitures à voyageurs, 15 voitures-buffet et wagons-restaurant et 47 fourgons à bagages. Les 132 voitures légères en acier forment la très modeste proportion de 3,9 % de l'ensemble du parc du matériel voyageurs ou 11 % des voitures à bogies. De 1937 à 1946, les C. F. F. n'ont mis en service que 230 voitures à voie normale, soit une moyenne de 23 unités par année, alors qu'il en eût fallu 95 pour remédier au vieillissement rapide du parc, la durée moyenne des voitures étant de 36 ans.

#### *Voitures légères du Brunig*

L'électrification de la ligne du Brunig, au début de la deuxième guerre mondiale, posa le problème de la construction de nouvelles voitures à voyageurs capables de satisfaire aux nouvelles conditions d'exploitation (augmentation de la vitesse maximum et du nombre des trains). Le profil en long est caractérisé par deux tronçons de plaine à adhérence présentant des déclivités maximum de 18 ‰ entre lesquels se place un tronçon à crémaillère de 15 km de longueur accu-

sant de chaque côté du point culminant des rampes de 120 ‰. Les automotrices à trois bogies (deux pour l'adhérence et un pour la crémaillère) sont capables de remorquer des trains de 240 t sur les parcours de plaine à la vitesse maximum de 75 km/h et de 60 t à 30 km/h sur les tronçons à crémaillère. En raison de l'augmentation du trafic, beaucoup de trains ont de 200 à 250 places, ce qui, avec l'ancien matériel, nécessite quatre voitures pesant complètement occupées 74 t et la double traction. Près de la moitié du parc des voitures est constituée par du matériel à 3 essieux ayant largement dépassé la limite d'utilisation et inapte à circuler aux nouvelles vitesses. Bien que les dernières voitures à bogies construites avec caisse en bois recouverte de tôles d'aluminium soient déjà légères, il s'avérait nécessaire, en vue d'éviter les doubles tractions, de réaliser un nouvel allègement important. Le choix se porta donc sur un châssis-caisse en alliages d'aluminium. L'étude des 27 nouvelles voitures indiquées dans les tableaux II et commandées en 1942 et 1943, fut confiée à la SIG.

Ces voitures, dont les huit premières ont été mises en service en 1945, se distinguent par leur forme simple, la disposition des portes donnant accès sur une large plate-forme centrale et les grandes dimensions des baies. On avait espéré obtenir une tare de 11 t seulement pour le type C<sup>41</sup>. En réalité la tare est de 12,6 t, ce qui donne un allègement de 19 % malgré une augmentation de la longueur totale d'environ 2 m. Le poids par unité de longueur a ainsi diminué de 28 %. L'augmentation de la tare par rapport aux prévisions est due à diverses améliorations apportées en cours de construction, telles que celles des freins (8 sabots par essieu au lieu de 4), la séparation des freins à adhérence et à crémaillère et le montage de soufflets d'intercommunication. En outre, les tôles de revêtement, à cause de leurs grandes dimensions, n'ont pas pu être livrées dans l'épaisseur voulue ; elles sont de quelque dixièmes de mm trop épaisses.

Dans la construction du châssis-caisse (fig. 2), le principe de la poutre tubulaire n'a pas pu être appliqué dans toute sa rigueur ; on s'en est rapproché le plus possible. Pour des raisons de fabrication, les deux traverses de tête et la partie centrale reliant celle-ci aux traverses de pivot sont en tôles d'acier doux ordinaire assemblées par soudure électrique. A première vue, il semble que l'emploi des alliages légers, dont le poids spécifique est environ trois fois plus petit que celui de l'acier, devrait procurer une économie de poids d'environ 65 % sur l'ensemble de l'ossature. En réalité, les choses sont bien différentes, car il faut tenir compte des difficultés d'exécution des liaisons (tôles minces) et du module d'élasticité des métaux légers, qui est environ trois fois plus petit que celui de l'acier. On est donc obligé d'utiliser des tôles plus épaisses et d'augmenter les renforcements, afin de diminuer les longueurs de flambage. Après une étude critique des différents procédés de soudure, on décida d'utiliser le plus possible la soudure électrique par points. Il fallut commander une machine spéciale permettant de souder des pièces de grandes dimensions. Les parois latérales sont reliées au châssis et au toit par des boulons, afin d'en faciliter le démontage en cas de réparation. D'autres liaisons inaccessibles à la machine à souder sont effectuées à l'aide de rivets en métal léger. Afin de réduire le nombre des liaisons tant soudées que rivées, un grand nombre de profilés nouveaux furent commandés par le constructeur. La partie centrale du châssis est formée de deux profilés en U calculés pour supporter seuls tous les efforts de choc et de traction. Les longerons extérieurs, de même que les battants de pavillon, sont formés chacun de deux profilés spéciaux assemblés à la soudure par points. Le plancher, dont la construction spéciale est bien

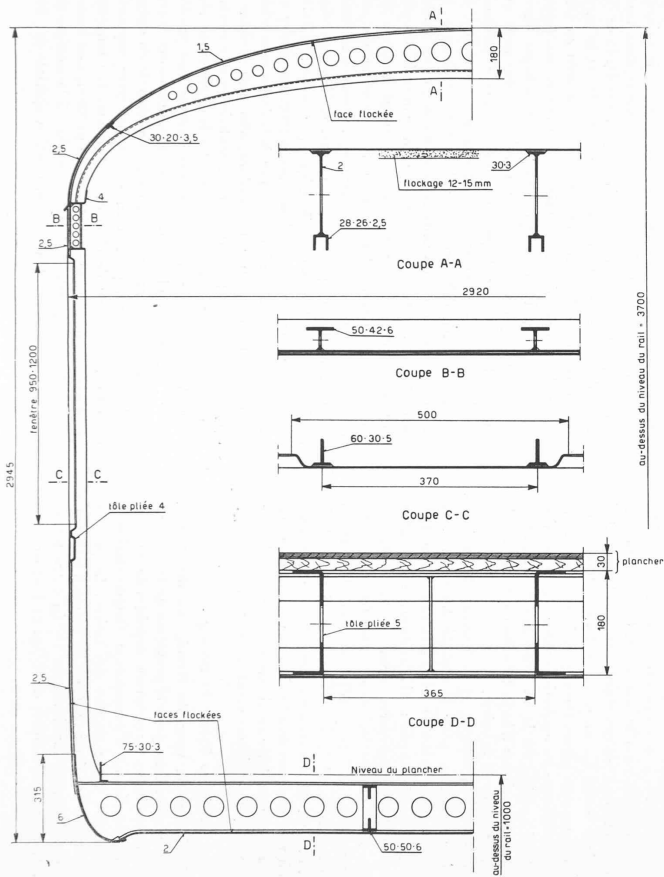


Fig. 1. — Demi-coupe transversale de l'ossature du châssis-caisse d'une voiture légère en acier.

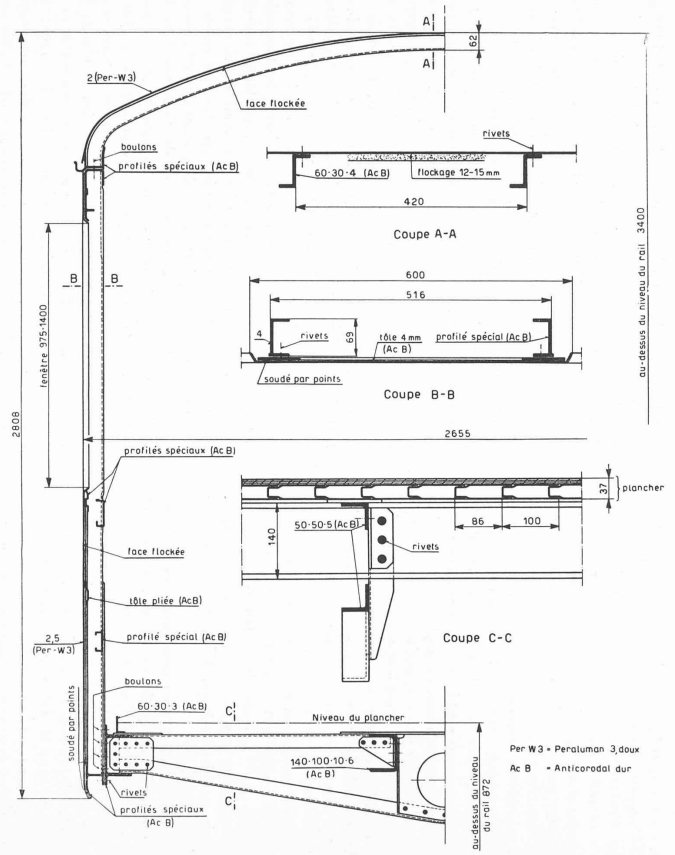


Fig. 2. — Demi-coupe transversale de l'ossature du châssis-caisse d'une voiture légère de la ligne du Brunig.

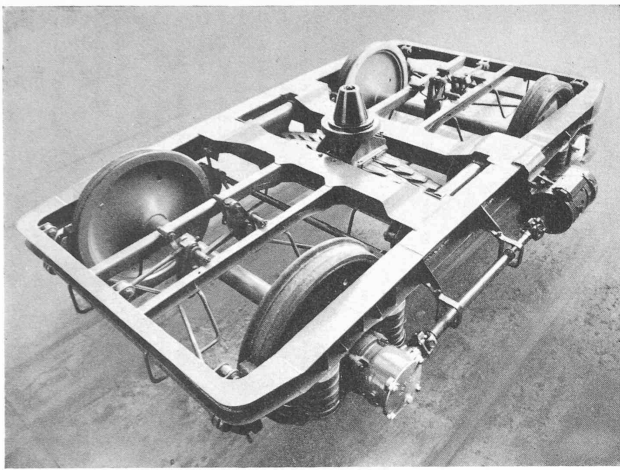


Fig. 6. — Bogie type SWS pour voitures légères de lignes secondaires.

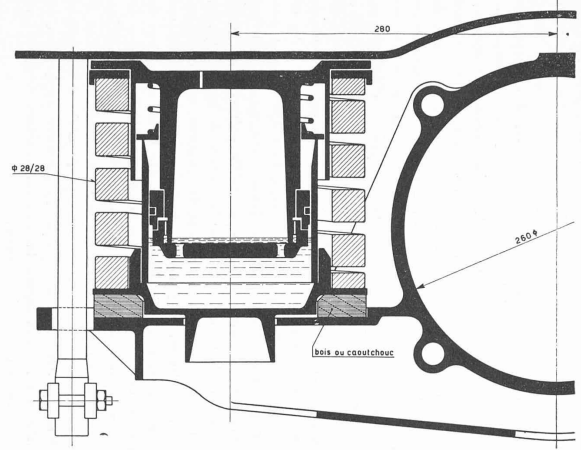


Fig. 4. — Amortisseur à huile du bogie SWS.

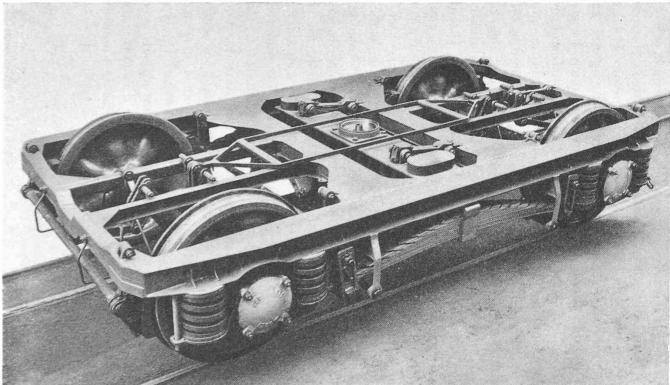


Fig. 3. — Bogie type SWS pour voitures légères.

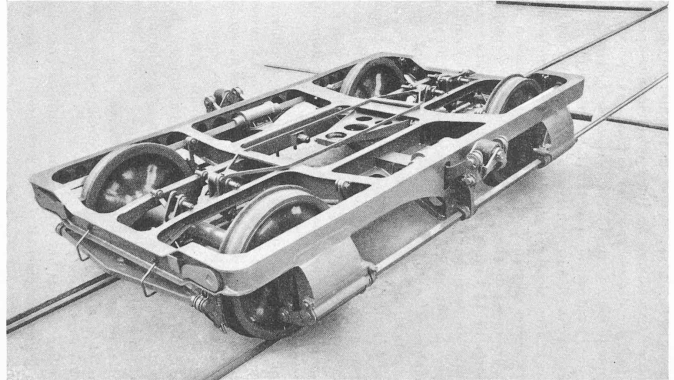


Fig. 5. — Bogie type SIG pour voitures légères en acier.



visible sur la fig. 2, se compose de profilés en métal léger s'emboîtant les uns dans les autres et soudés aussi par points. Il est fixé par des vis spéciales sur les traverses du châssis et augmente ainsi la rigidité de l'ensemble châssis-caisse. Le poids de l'ossature ainsi obtenue est de 3900 kg.; il se répartit comme il suit: châssis 1700, plancher 400, parois latérales et frontales 1300 et toiture 500 kg. Comme celle des voitures légères en acier, l'ossature du châssis-caisse a été soumise à des essais de charges statiques complets, comprenant une charge de 13 t répartie sur toute la longueur et un effort horizontal de compression de 60 t appliqué au milieu des traverses de tête et à peu près à la hauteur du dispositif d'accouplement automatique. Les résultats ont été très satisfaisants et ont démontré l'excellente tenue de toutes les liaisons. Les contraintes calculées à l'aide des déformations mesurées sont bien en-dessous de la limite élastique des matériaux employés. Cela provient du fait que l'on n'a pas tenu compte de la participation des tôles de revêtement dans les calculs de résistance.

Chaque voiture est équipée avec un bogie à adhérence et un bogie à crémaillère de construction soudée. La suspension de la caisse se compose de deux barres de torsion, tandis que celle du châssis sur les essieux comporte des ressorts hélicoïdaux placés de chaque côté de la boîte d'essieux. Les essieux montés ont été allégés par l'emploi de corps de roues en alliage léger, sur lesquels sont montés des bandages en acier, et par le forage de l'axe de l'essieu. Le bogie à adhérence, qui porte la dynamo d'éclairage entraînée par un arbre à cardans et une boîte d'engrenages coniques, pèse 1980 kg et celui à crémaillère 2120 kg.

Les alliages légers ont été largement utilisés pour diverses parties de l'aménagement intérieur, les portes et les tuyauteries de frein.

#### *Voitures légères de lignes secondaires*

Le parc de matériel voyageurs pour voie normale se compose encore d'environ 2200 voitures à 2 et 3 essieux, formant les  $\frac{2}{3}$  de l'effectif, dont le confort laisse beaucoup à désirer et qui sont de plus en plus critiquées par les voyageurs, surtout depuis l'apparition des voitures légères en acier. Le remplacement de ce matériel démodé ou sa transformation en voitures à bogies, avec nouvelle caisse métallique, pose un problème épineux, auquel il faudra bien trouver une solution satisfaisante à plus ou moins bref délai. Pour des raisons financières et par suite du suremploi dans l'industrie, la première solution n'entre pas en ligne de compte. Quant à la transformation dans le sens indiqué, un premier essai est actuellement tenté. Il s'agit de 11 voitures mentionnées dans le tableau II, à savoir 5 de la série BCF<sup>4</sup> avec compartiment pour bagages, qui doivent tenir lieu de remorques aux flèches rouges, et 6 des séries BC<sup>4</sup> et C<sup>4</sup> avec plates-formes ouvertes aux deux extrémités. L'ossature du châssis-caisse est une construction mixte, dans laquelle une caisse en alliages légers est montée sur l'ancien châssis en acier doux, muni de ses deux tirants, et supportant à lui seul tous les efforts dus aux charges verticales et horizontales. Pour la caisse, on a utilisé les mêmes profilés que dans les voitures du Brunig, mais en simplifiant notablement la construction. Les parois latérales sont rivées par l'intermédiaire d'un gousset à des traverses en U en métal léger, elles-mêmes boulonnées sur le châssis avec interposition d'une feuille en bois comprimé destinée à servir d'isolant entre les parties en acier et en métal léger. Le poids de l'ossature de la voiture BCF<sup>4</sup> est de 7 t; il se répartit à raison de 4 t pour le châssis et 3 t pour la caisse.

Ces voitures seront équipées à titre d'essai avec un bogie, de construction analogue à celui des voitures légères en acier, présentant certaines particularités (fig. 6). La suspension de la caisse est également assurée par deux ressorts à lames, mais placés côte à côte, dans le sens transversal, et suspendus au châssis par des bielles inclinées de manière à obtenir un effort permanent de centrage. La caisse repose sur une crapaudine centrale fixée au milieu des ressorts, qui jouent ainsi le rôle de traverse danseuse. Cette disposition a permis de réduire l'écartement des essieux à 2,30 m et de supprimer les appuis latéraux de la caisse. En raison de la faible tare des voitures, les dimensions de l'axe de l'essieu, allégé par un trou de 55 mm de diamètre, ont pu être quelque peu diminuées. Les roues, à bandages rapportés, sont munies de centres pleins en acier coulé fabriqués en Suisse. Le poids de l'essieu-monté est de 740 kg, c'est-à-dire d'environ 50 kg de plus que celui du type « Uerdingen ». Le bogie complet pèse 3300 kg et celui qui porte la dynamo d'éclairage 3400 kg.

Les tares présumées de ces nouvelles voitures sont indiquées dans le tableau II. Pour la voiture de la série C<sup>4</sup>, on obtient donc un poids par unité de longueur de 1085 kg/m, d'où il résulte un allègement de 10 % par rapport à la voiture légère en acier de la même série. Cette faible réduction de poids s'explique par le fait que la caisse en alliages légers ne participe pas à la résistance de l'ensemble et par la réutilisation de l'ancien châssis avec ses lourds appareils de choc et de traction. Cette nouvelle construction méritait cependant d'être signalée, car elle marque la première application en Suisse des métaux légers dans la construction de l'ossature des voitures pour voie normale.

\* \* \*

Dans le tableau III, nous avons réuni quelques données intéressantes concernant les principales formations de trains légers et leur développement depuis 1936. Comme termes de comparaison, nous avons utilisé le poids par place assise et la puissance spécifique en CV/t, qui se rapportent tous deux au poids total du train (véhicules moteur compris). Pour les voitures légères en acier, nous avons admis une tare moyenne de 28 t et tenu compte, dans le nombre de places assises, des dix strapontins des voitures de troisième classe. Il ressort de ce tableau qu'un train formé d'au moins sept voitures légères en acier et d'une locomotive Re<sup>4</sup>/4 est aussi économique que l'automotrice rapide à trois éléments, tout en offrant à peu près deux fois plus de places assises.

L'allègement du matériel exerce un effet direct sur les dépenses de traction, puisqu'il diminue la charge du train et, par suite, la consommation d'énergie; ou alors la capacité de transport d'un train peut être augmentée sans qu'il en résulte une augmentation sensible des frais d'exploitation. Aux C. F. F., on a profité de l'allègement du matériel pour augmenter la vitesse maximum des trains, d'où une diminution des temps de parcours et une utilisation plus complète des véhicules. Les voitures légères sont toutes munies de boîtes d'essieux avec roulements à rouleaux, ce qui réduit la résistance spécifique au roulement. Au démarrage, cette résistance est environ la moitié de celle des voitures avec paliers à coussinets lisses. En marche, la réduction est moins élevée et n'a pas d'effet sensible sur l'effort de traction nécessaire pour accélérer la marche du train. L'allègement offre cependant encore d'autres avantages, quoique difficilement chiffrables:

1. Une économie sensible réalisée sur le poids total des matières entrant dans la construction.
2. Une diminution des frais d'entretien de la voie, du fait de la plus faible charge par essieu.

TABLEAU III. Comparaison entre différents trains légers.

Formation du train	Nombre de places			Poids du matériel en t.			Poids mort par place kg	Puissance spécifique CV/t
	2 <sup>e</sup> cl.	3 <sup>e</sup> cl.	total	Véhicule moteur	Véhicules remorqués	total		
Automotrice rapide RCe <sup>2</sup> / <sub>4</sub> + remorque légère BCF <sup>4</sup> . . . . .	16	102	118	35	22	57	483	9,4
Train automoteur rapide à 3 éléments RBCFe <sup>8</sup> / <sub>12</sub> . . . . .	30	192	222	127	—	127	572	18,0
Locomotive Ae <sup>3</sup> / <sub>6</sub> + 1 fourgon + 3 voitures (matériel lourd) . . . . .	48	156	204	95	132	227	1100	9,3
Fourgon automoteur rapide RFe <sup>4</sup> / <sub>4</sub> + 3 voitures légères en acier . . . . .	48	164	212	47	84	131	618	9,9
Locomotive Ae <sup>3</sup> / <sub>6</sub> + 1 fourgon-poste + 6 voitures (matériel léger en acier) . . . . .	96	328	424	95	192	287	678	7,3
Locomotive Re <sup>4</sup> / <sub>4</sub> + même composition que ci-dessus . . . . .	96	328	424	56	192	248	585	9,9
Locomotive Re <sup>4</sup> / <sub>4</sub> + 1 fourgon-poste + 1 wagon-restaurant + 8 voitures . . . . . (matériel léger en acier)	144	462	606	56	281	337	557	7,3

3. Les trains peuvent être remorqués par des locomotives moins puissantes, donc plus légères, moins coûteuses et fatiguant moins la voie.

Ce dernier avantage a été concrétisé par la création de la locomotive légère et rapide de la série Re<sup>4</sup>/<sub>4</sub>, qui permet de tirer tout le parti possible de l'allègement du matériel, comme le montre nettement le tableau III.

Le prix d'achat des voitures légères en acier était, avant la guerre, d'environ 25 % plus élevé que celui des voitures en acier du type lourd. Cette augmentation est due en bonne partie aux nombreuses améliorations apportées à la construction pour diminuer les frais d'entretien et augmenter le confort des voyageurs. En outre, l'emploi généralisé de la soudure électrique demande une main-d'œuvre spécialisée d'où une augmentation des frais de construction.

L'allègement du matériel peut être coûteux en soi, il n'en demeure pas moins que ses avantages sont assez réels pour le justifier. Relevons que, dans l'accident de Schupfheim, en automne 1943, deux voitures légères en acier ont fourni expérimentalement la preuve que ce matériel offre une très haute résistance aux efforts dynamiques en cas de collision et, par suite, une grande sécurité pour les voyageurs.

Le matériel roulant léger que nous venons d'examiner permet donc aux C. F. F. de réaliser pleinement les trois grandes conditions qu'ils se sont toujours imposées : la sécurité, la vitesse et le confort.

## De quelques installations électriques des chemins de fer

par A. BORGEAUD, adjoint à l'ingénieur en chef de la division des travaux du 1<sup>er</sup> arrondissement des C.F.F., à Lausanne.

621. 332. 3

### A. Le courant électrique de traction.

En 1888, le premier tramway électrique de Suisse circulait sur le tronçon Vevey-Montreux-Chillon d'une longueur de 10,5 km, en utilisant le courant continu, 500 volts. La décennie suivante fut marquée par le développement rapide des tramways et des chemins de fer secondaires à traction électrique, les premiers utilisant principalement le courant continu et les seconds le courant triphasé. Si bien qu'au

début de notre siècle, le problème de l'électrification des chemins de fer à voie normale était fréquemment soulevé.

On entra dans la voie des réalisations en appliquant les systèmes les plus divers :

Chemins de fer à voie normale	Date de l'ouverture à l'exploitation élec.	Km	Genre de courant électrique
Orbe-Chavornay . . . . .	1894	4	C 660 V
Berthoud-Thoune . . . . .	1899	41	A <sub>3</sub> 750 V, 40 Hz
Fribourg-Morat-Anet . . . . .	1903	33	C 840 V
C. F. F. ; Simplon . . . . .	1906	22	A <sub>3</sub> 3300 V, 16 <sup>2</sup> / <sub>3</sub> Hz
Seethal . . . . .	1910	55	A <sub>1</sub> 5500 V, 25 Hz
Lötschberg . . . . .	1910	14	A <sub>1</sub> 15000 V, 16 <sup>2</sup> / <sub>3</sub> Hz
Martigny-Orsières . . . . .	1910	20	A <sub>1</sub> 8000 V, 15 Hz

C = courant continu.

A<sub>1</sub> = courant monophasé.

A<sub>3</sub> = courant triphasé.

Hz = hertz ou périodes par sec.

En 1901 déjà, à l'assemblée générale de l'Association suisse des électriciens, le Dr E. Tissot proposa de pousser l'étude de l'électrification des chemins de fer principaux et de créer dans ce but une commission spéciale. Cette commission fut formée en 1904 avec l'appui des C. F. F. et du Département fédéral des chemins de fer ; elle étudia le problème dans tous ses détails et ses rapports furent rédigés par le professeur Dr W. Wyssling.

En 1906, elle publia un premier rapport sur l'énergie nécessaire à la traction électrique, en 1909 un autre sur le choix de la fréquence et, en 1912, elle présenta son rapport final sur le choix du système, accompagné d'un devis. Ses conclusions disaient en substance : En tenant compte des conditions particulières aux C. F. F. et spécialement celles de la ligne du Gothard, le système le plus adéquat à la traction des chemins de fer principaux réside dans l'emploi d'un courant monophasé d'une fréquence d'environ 15 périodes par seconde avec une tension à la ligne de contact de 15 000 volts.

Comme on désirait que la fréquence du courant de traction soit un sous-multiple de la fréquence du courant industriel, on hésitait entre 13 <sup>1</sup>/<sub>3</sub> et 16 <sup>2</sup>/<sub>3</sub> Hz, car on n'avait pas encore décidé si le courant industriel aurait 40 ou 50 Hz, ce qui explique l'expression « environ 15 périodes par seconde » employée par la commission.

Dès lors, les chemins de fer suisses à voie normale furent électrifiés en appliquant à la ligne de contact un courant alternatif monophasé d'une fréquence de 16 <sup>2</sup>/<sub>3</sub> Hz.