

LES TRAMWAYS A PLANCHER SURBAISSÉ DÉVELOPPEMENTS RÉCENTS ET PERSPECTIVES



Georges MULLER,
né en 1942 à Strasbourg, Ingénieur de l'Ecole Polytechnique de Zurich, a consacré sa carrière à la traction électrique dans les transports urbains, tramways, trolleybus, crémaillères, d'abord en Suisse, puis à Lyon, Lille et Grenoble. Expert auprès de nombreux projets de tramways aux Etats-Unis, en Amérique du Sud. Responsable depuis 1990 des études et de la construction du Tramway à la Compagnie des Transports Strasbourgeois.

2038

Depuis une dizaine d'années la plupart des nouveaux matériels de tramways se démarquent des constructions traditionnelles par la tentative d'abaisser le plancher aussi bas que possible.

Bref historique des tramways à plancher bas

L'idée du tramway à plancher surbaissé est centenaire !

En 1896, la première ligne urbaine souterraine à traction électrique est inaugurée à Budapest. Cette ligne, mi-tramway, mi-métro, est établie à faible profondeur, et on réduit au minimum la section du tunnel pour des raisons économiques.

Les automotrices, qui peuvent aussi circuler en surface sur les voies de tramway ordinaires, prennent leur courant par une ligne aérienne ; la caisse repose sur deux bogies moteurs, au-dessus desquels une cabine aux dimensions très réduite permet au conducteur d'assurer la conduite du

véhicule. Entre les deux bogies, le châssis du véhicule s'incurve et s'abaisse jusqu'à une très faible distance des rails ; l'accès se fait de plain-pied par une plate-forme centrale.

En 1912, sous la pression d'organisations féminines locales, jugeant

indécent pour une voyageuse d'être obligée de relever sa longue robe pour escalader les marchepieds des tramways existants, les tramways de New York étudient et font construire 176 motrices à bogies, dont la très large plate-forme centrale est surbaissée à 210 mm au-dessus du niveau de la

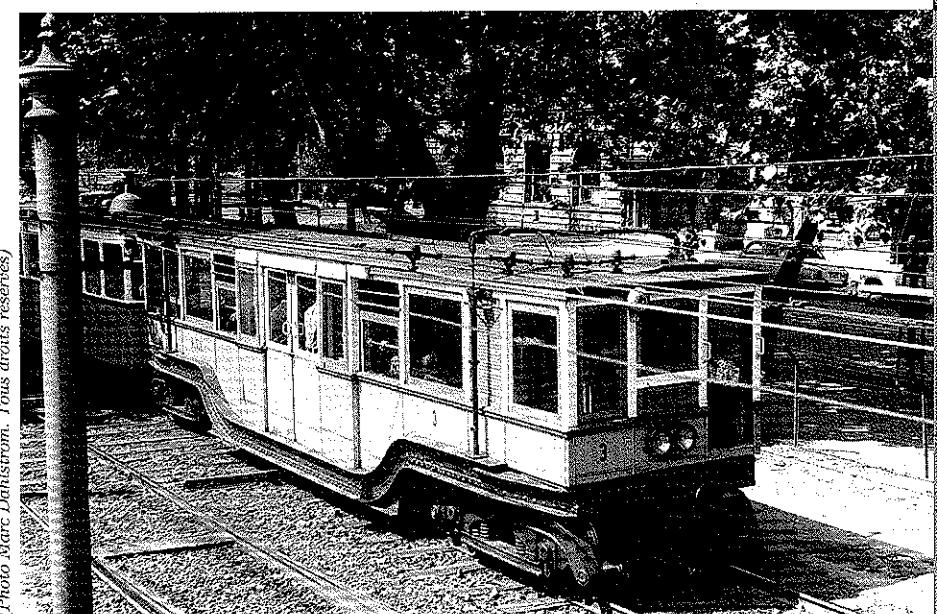


Fig. 1. - Rame du « petit » métro de Budapest (matériel de 1896).



Fig. 2. – Rame du tramway Bonn - Bad Godesberg - Mellheim vers 1950, comportant une remorque à bogies à plate-forme centrale surbaissée.

chaussée ; d'autres réseaux, en particuliers en Californie, passeront commande d'unités semblables qui seront toutes retirées, prématurément, à la fin des années vingt, en raison de l'impossibilité d'exploiter, sans reconstruction totale, ces véhicules pour le service à un agent.

A la même époque en Allemagne (Nuremberg, Bonn, Francfort-sur-le-Main, Dortmund) apparaissent d'intéressants modèles, malheureusement construits à peu d'unités, de remorques à plate-forme centrale dont le plancher de l'entrée est à 365 mm seulement au-dessus du plan des rails.

Introduire des principes analogues dans une motrice était un autre problème en raison du volume des équipements de traction.

Le pari est pourtant tenu par Montrose-Oster, Ingénieur aux Tramways d'Essen, qui étudie et fait réaliser, en 1934, par Orenstein & Koppel et AEG une motrice révolutionnaire dotée d'un plancher surbaissé à 380 mm sur toute sa longueur. La partie mécanique de cette motrice à plate-forme centrale se compose d'un châssis doté de 4 roues indépendantes, non reliées entre elles par un essieu traditionnel, avec un empattement inusité de 6,80 m pour une longueur totale de 11,25 m du véhicule.

Chaque roue est accouplée à un réducteur relié par cardan à un

moteur de traction à courant continu de 33 kW suspendu dans le châssis. Les roues indépendantes s'orientaient dans les courbes perpendiculairement au rayon grâce à un jeu de leviers et de bielles de direction. Les moteurs et les roues pénétraient partiellement dans la caisse, mais étaient cachés par les sièges.

On sait peu de choses sur le comportement dynamique de la motrice (505) « Montos » qui sera rejoints par une remorque semblable (506) en 1942, l'attelage devant disparaître prématurément sous les bombes l'année suivante.

Après la guerre, la nécessité de reconstruire exige de faire appel à des solutions simples et rationnelles.

Le réseau de Rome, cependant, qui doit mettre en œuvre un énorme programme de renouvellement, étudie et fait construire, en 1948, par l'aviateur Caproni et par Tecnomasio Italiano Brown Boveri, 2 motrices prototypes à bogies, longues de 14 m, reposant, à l'avant sur un bogie bimoteur traditionnel à roues de 660 mm, à l'arrière sur un petit bogie porteur à roues de 400 mm. Le sas d'entrée, situé à l'arrière, est à 410 mm au-dessus du rail et remonte en pente douce vers l'avant de la motrice. On pénètre donc de plain-pied dans ces véhicules, qui souffrent néanmoins d'un poids adhérent trop faible et ont des performances bien inférieures à celles des nouvelles rames articulées.

En Suisse, les Usines Schindler reprennent l'idée et fournissent aux Tramways de Bâle 3 motrices ultralégères (12 t) à bogies de conception similaire pour la voie métrique. En raison de leur manque d'adhérence, qui leur interdit la traction d'une remorque, les 3 « Bugatti » sont radiées lorsque sonne l'heure de leur présentation en deuxième révision générale.

Ces exemples n'empêchent pas les Tramways de Rotterdam de commander à Schindler 15 motrices à bogies et 14 motrices articulées à 2 caisses relevant de la même conception que plus haut, livrées en 1956-1957. Dans les deux cas, la partie arrière du véhicule repose sur un petit bogie porteur à roues de 500 mm et l'on accède de plain-pied à la plate-forme arrière. Afin d'augmenter l'adhérence et les performances des rames articulées, celles-ci sont pourvues de 2 bogies moteurs ; elles sont cependant radiées prématurément en raison de la difficulté à les adapter au service à un agent.

On ne reparle plus alors de plancher bas jusqu'au Concours Cavaillé de 1975 visant à industrialiser un « Tramway Français Standard ». Le projet CITADIS, élaboré par la Société M.T.E., prévoit une rame articulée à trois caisses sur trois bogies, dont deux moteurs. Entre chaque bogie, le plancher est situé à 240 mm au-dessus du plan de roulement et, à l'arrêt, le dégonflement partiel des coussins d'air permet à la rame de s'agenouiller de 40 mm supplémentaires.

Malgré l'intérêt indéniable de la solution à plancher bas, le CITADIS souffre de l'inconvénient majeur d'un bogie médian traditionnel, exigeant une remontée très importante du sol pour franchir la zone de l'articulation. Ce handicap est considéré comme rédhibitoire et le projet, un peu trop en avance sur son époque, n'est pas retenu.

En 1982-1983, lorsque les études du futur tramway grenoblois atteignent leur phase définitive, les associations locales de personnes handicapées approchent les élus en leur demandant d'être associées aux réflexions, l'objectif avoué étant de pouvoir utiliser librement le futur moyen de transport.

La première idée est alors d'intercaler entre les deux caisses motrices du futur tramway de Nantes, alors en construction, une caisse intermédiaire dont le châssis serait surbaissé entre les deux bogies porteurs. Strasbourg, dont on dit alors que le projet va devenir réalité, s'associe à cette étude.

L'apparition, entre-temps, du prototype Vevey-ABB à Genève, où le plancher était abaissé à 480 mm entre les bogies moteurs extrêmes, et ce sur toute la zone desservie par les portes, a un fort impact sur les élus et les techniciens grenoblois ; certes, on n'en était pas encore à pouvoir accéder librement au tramway un fauteuil roulant, mais le simple fait de n'avoir plus qu'une marche à franchir à la montée était un progrès important.

Dès lors, la voie était tracée pour le futur tramway grenoblois, et ses concepteurs imposèrent au constructeur du matériel roulant, GEC Alsthom, une cote de 350 mm pour la partie du plancher desservant les plates-formes d'accès.

La mise en service du tramway de Grenoble en 1987 a marqué un tournant dans l'évolution des tramways, non seulement à cause de son esthétique sortant des sentiers battus, due à IDPO-Ph. Neerman, mais en raison de son extrême facilité d'accès et pour le gain de productivité obtenu, en matière de maintenance, en disposant en toiture l'ensemble de l'appareillage de traction et des auxiliaires.

La supériorité de la formule par rapport aux executions classiques, quant à l'exploitation, devait être vérifiée l'été suivant quand la rame grenobloise 2020 fut prêtée aux Tramways de Rotterdam (RET). Circulant sur la ligne 2 de ce réseau, mêlée aux rames classiques Düwag/Holec (1983) du réseau, avec une fréquence de 10 minutes, la rame TAG n'avait aucune peine à rattraper la rame RET précédente aux trois quarts du parcours en raison des temps d'arrêt moindres en station grâce au plancher surbaissé. La preuve était faite que les tramways à plancher bas étaient désormais, en tous points, supérieurs aux autres et mieux adaptés au service urbain.

Très vite, cependant, la formule du tramway de Grenoble, où le réem-



Fig. 3. – Rame Alsthom de 1985, transformée avec caisse centrale surbaissée.

(Photo P.F. Gérard/SEMITIN)

ploi des bogies moteurs et des équipements de Nantes impliquait un plancher surélevé à 860 mm aux extrémités, a montré ses limites dans la mesure où le remplissage réel a toujours été inférieur à la capacité théorique, les voyageurs, en heure de pointe, répugnant à remplir les zones extrêmes surélevées et préférant s'agglutiner dans les zones voisines des portes.

Pour les concepteurs du futur tramway de Strasbourg, il apparaît évident, dès mars 1990, que, au vu des expériences, au niveau du trafic, des réalisations nantaise et grenobloise, un nouveau et substantiel gain de productivité ne pouvait être atteint que par le choix d'un matériel roulant à plancher bas intégral, idée d'ailleurs à l'étude chez la plupart des constructeurs européens.



Fig. 4. – C'est de Genève que tout est parti...

(Photo G. Müller)

Tramways conventionnels à section surbaissée réduite

Jusqu'au milieu des années quatre-vingt, la totalité des tramways modernes, articulés ou non, était dotée d'un plancher horizontal, reposant sur un jeu de bogies, moteurs ou porteurs, situé à environ 900 mm, parfois davantage, par rapport au niveau du rail, l'accès se faisant par un emmarchement de 3 ou 4 marches, l'ensemble des équipements de puissance et des auxiliaires, à l'exception des résistances de freinage, étant disposé sous le plancher.

Devant le succès des réalisations de Genève (1984) et surtout de Grenoble (1987), plusieurs réseaux exploitant des matériels conventionnels modernes décident de transformer les unités récentes en intercalant, entre les caisses motrices de leurs rames articulées, une caisse intermédiaire s'articulant entre les précédentes et s'appuyant dès lors sur deux bogies porteurs ; l'absence d'équipement électrique ou pneumatique complémentaire permet alors d'abaisser le plancher de la nouvelle caisse médiane à une distance très faible, limitée uniquement par le profil en long des lignes utilisées. Les réseaux réalisent aussi un intéressant effort de productivité en augmentant la capacité unitaire de chaque rame transformée, tout en

donnant partiellement satisfaction aux associations de handicapés, de mieux en mieux organisées, qui luttent en faveur d'un accès facile des véhicules de transport public aux personnes à mobilité réduite.

Le premier réseau à se lancer dans cette transformation est le B.L.T. de Bâle, qui exploite les lignes suburbaines de la métropole rhénane dans le Canton de Bâle Campagne.

Quarante et une rames articulées Schindler, à deux caisses sur trois bogies sont ainsi rallongées en recevant un bogie porteur complémentaire et une caisse médiane dont le plancher est surbaissé entre les bogies porteurs, permettant un accès de plain pied dans cette partie du véhicule, facilité particulièrement appréciée par les mères de famille accompagnées d'une poussette.

Une transformation similaire sera entreprise, en 1991, par le réseau de Mannheim sur 23 rames Düwag à deux caisses 1962-1964 dont la durée de vie, grâce aux réaménagements intérieurs effectués, se trouve ainsi rallongée d'une dizaine d'années.

En France aussi, Nantes, premier nouveau réseau français, fait transformer par Alsthom les 34 premières rames réversibles.

Ce matériel, dont les 20 premières unités construites par Alsthom en 1984-1985 ont servi à mettre en service le premier nouveau tramway français, est inspiré, au gabarit près, des rames Stadtbahn B apparues à Cologne en 1973. Il est constitué de deux caisses en aluminium reposant sur trois bogies, les deux bogies d'extrémité étant monomoteurs ; les équipements de traction et les auxiliaires étant essentiellement disposés sous le plancher, il en résulte un plancher horizontal situé à 873 mm, les quatre portes doubles et les deux portes simples d'accès par face latérale étant dotées de deux marches intermédiaires et d'une marche inférieure rétractable.

Dans la perspective de la mise en service de la deuxième ligne, la SEMITAN décide alors de transformer les 34 rames existantes en leur adjoignant une caisse médiane comportant une zone surbaissée à 353 mm sur une longueur de 6,40 m ;

actuelles, y compris les rames les plus récentes construites d'emblée sur la nouvelle configuration, sont à présent pourvues de la caisse médiane surbaissée. Avec une longueur de 39,15 m, ce sont, à l'heure actuelle, les plus longs tramways de France.

D'autres réseaux prennent aussi livraison de rames entièrement neuves construites suivant le même schéma ; ce choix, toujours imparfait, évite de bouleverser l'organisation des ateliers d'entretien et repousse à plus tard l'acquisition de matériels plus révolutionnaires à plancher bas intégral.

Ainsi les Tramways d'Amsterdam qui mettent en service au début des années quatre-vingt-dix 45 rames articulées (Bruggeoise & Nivelles/Holec), dont 25 sont bidirectionnelles. En raison des rayons de courbure très prononcés sur ce réseau, la distance entre pivots de bogies est faible (6 550 mm contre 10 650 mm à Nantes) et, de ce fait, la surface de la partie surbaissée a une aire de 5,52 m² seulement, contre 14,7 m² à Nantes. C'est la surface surbaissée la plus faible

Réseau	Voie (mm)	Année	N°	Transmission	Constructeur	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Plancher bas (mm)	Plancher haut (mm)	Places ass/deb (4/m ²)	Tare (t)	P (kW)
Bâle	1 000	1987	41	B'2'2'B'	Schindler/Siemens ABB	25 500	2 200	330	860	60	30,5	2 x 150
Mannheim	1 000	1991	23	B'2'2'B'	Düwag/ABB	25 700	2 200	350	880	55/100	27,2	2 x 120
Nuremberg	1 435	1992	12	B'2'2'B'	MAN/Düwag/Siemens	26 120	2 300	295	880	52/196	33,2	2 x 120
Ostende	1 000	1994	16	B'2'2'B'	Bombardier ACEC	29 360	2 500	350	870	70/120	42,6	2 x 118
Nantes	1 435	1991-94	46	B'2'2'B'	GEC-Alsthom	39 150	2 300	350	850	74/190	51,6	2 x 275

Tableau I. - Tramways conventionnels à section surbaissée réduite (transformations de véhicules classiques).

Opération encore similaire menée à Nuremberg en 1991 sur les 12 rames Stadtbahn N6 de 1977. Le succès de l'opération a définitivement conquis les citadins aux avantages du tramway moderne avec accès surbaissé, et une première série de 14 rames AEG est en cours de construction.

Toujours sur le même thème, 16 rames articulées du célèbre tramway interurbain belge De Panne - Ostende - Knokke-le-Zout ont été dotées en 1994 d'une caisse centrale surbaissée.

la zone surbaissée comporte un compartiment offrant 12 places assises, encadré par deux grandes plates-formes ; celles-ci sont dotées, comme à Grenoble, de palettes rétractables pouvant être manœuvrées à la demande, et la transition intérieure du niveau surbaissé aux caisses motrices se fait par l'intermédiaire de trois marches.

Dans sa catégorie, le matériel de la SEMITAN (Nantes) relève de la conception la plus imaginative, et la totalité du parc des 46 rames

pour un véhicule de cette catégorie ; malgré une cote de 280 mm du plancher à cette entrée, les voyageurs utilisant cet accès sont obligés, pour accéder au reste du véhicule, de franchir immédiatement trois marches. Il n'y a aucune disposition particulière pour accueillir correctement une personne se déplaçant en fauteuil roulant.

Ces rames sont équipées de bogies PCC B-3 avec 2 moteurs triphasés de 88,5 kW et freinent par récupération.

Les rames contemporaines (1990), construites par L.H.B./Siemens pour Würzburg et par DÜWAG/ABB pour Fribourg, ont en commun d'être également à adhérence totale, mais d'avoir deux des quatre bogies moteurs disposés sous la caisse médiane, les deux articulations étant flottantes.

Tandis que la partie surbaissée (270 mm) de Fribourg est traitée, de manière classique comme à Bâle, avec deux emmarchements longitudinaux à quatre marches pour regagner les 910 mm du niveau général, la caisse médiane du tram de Würzburg comporte un sas surbaissé (310 mm) de $5,50 \text{ m}^2$, que les voyageurs cheminant à l'intérieur de la rame peuvent éviter par une galerie surélevée (910 mm) latérale, le passage d'un niveau à l'autre se faisant par deux marches transversales de 300 mm.

Une variante originale récente est le nouveau matériel DÜWAG/Siemens de Sheffield (1994). Toujours sur le thème de la rame articulée à trois caisses sur quatre bogies moteurs, les articulations étant flottantes, les zones surbaissées ($2 \times 14,8 \text{ m}^2$) se trouvant réparties entre les bogies des deux caisses d'extrémités, bogies moteurs ; la version Sheffield, dans le



Fig. 5. – Fribourg en Brisgau : rame DÜWAG/ABB de 1990 avec caisse centrale surbaissée.

domaine des véhicules « classiques », est particulièrement intéressante. Son architecture générale a été reprise en 1995 pour Sarrebruck.

Une variante mieux adaptée à un service urbain est apparue à Fribourg en 1994. Les bogies bimoteurs sont pourvus de deux moteurs transversaux asynchrones refroidis par eau,

et le diamètre des roues neuves est réduit à 590 mm. Grâce au report de l'ensemble des équipements électriques en toiture, chaque face latérale est pourvue de quatre entrées surbaissées réparties le long de la rame ; le passage des zones surbaissées à 350 mm à celles enjambant les bogies se fait par le franchissement d'une marche ; dans les zones



Fig. 6. – Sheffield : rame DÜWAG/Siemens à plancher bas (1994-1995).

(Photo G. Müller)

(Photo G. Müller)

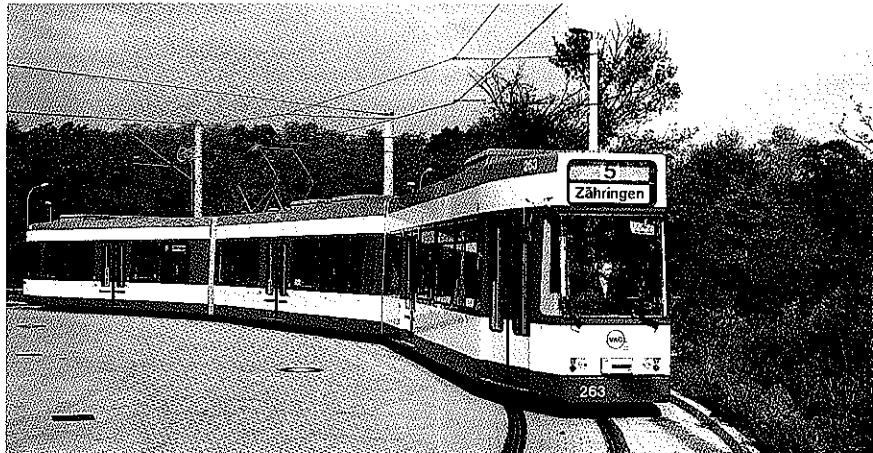


Fig. 7. - Fribourg en Brisgau : rame à plancher bas Düwag/ABB de 1994.

culation est flottante et le nez de la caisse arrière repose sur un bogie porteur, extrapolé des trucks porteurs Vevey ; ce petit bogie est pourvu de quatre roues de Ø 375 mm et les essieux sont distants de 1 200 mm.

Sur 12,5 m de long, soit 57 % de la longueur utile de la rame, le plancher est à 480 mm au-dessus du

Réseau	Voie (mm)	Année	N°	Transmis-sion	Construc-teurs	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Plancher bas (mm)	Plancher haut (mm)	Places ass/deb.	Tare (t)	P (kW)
Amsterdam	1 435	1989	45	B'B'B'B'	Bombardier/RMO/Hölec	26 050	2 350	280	870	64/94	37,5	8 x 40
Würzburg	1 000	1990	14	B'B'B'B'	LHB/Siemens	32 600	2 400	310	910	76/132	42,5	4 x 160
Fribourg/br.	1 000	1990	11	B'B'B'B'	Düwag/ABB	32 850	2 300	270	910	82/121	38,5	4 x 150
Sheffield	1 435	1994	25	B'B'B'B'	Düwag/Siemens	34 750	2 650	480	880	90/160	45,4	4 x 250
Fribourg/Br.	1 000	1994	26	Bo'Bo'Bo'Bo'	Düwag/ABB	33 090	2 300	330	560	84/114	38,2	8 x 80

Tableau II. - Tramways conventionnels à section surbaissée réduite (constructions neuves).

surélevées, les sièges sont placés sur des podiums laissant émerger les roues des bogies.

faisant appel à leur truck transporteur à voie métrique, pour le transport des wagons à voie normale, utilisé pour la circonstance comme bogie porteur.

Le modèle genevois est une rame unidirectionnelle articulée à deux caisses, dont chaque extrémité repose sur un bogie monomoteur Düwag à roues de 660 mm. L'arti-

niveau du rail, ce qui nécessite, tout de même, à chacune des 4 portes, la présence d'un marchepied rabattable offrant une marche intermédiaire à la cote de 260 mm. Au niveau des bogies moteurs extrêmes, deux marches conduisent à des petites plates-formes surélevées à 870 mm.

Des 48 rames d'origine, 18 sont en cours de transformation par l'ad-

Tramways à plancher bas partiel (2^e génération)

Il s'agit là de matériels dont la partie surbaissée est prédominante, mais où l'utilisation de bogies moteurs de conception classique, situés aux extrémités de la rame, rend nécessaire la présence de zones surélevées situées au droit de la motorisation.

On peut distinguer trois familles principales de véhicules.

Tramways munis de bogies porteurs Vevey ou assimilés

Au début des années quatre-vingt, les Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey, au passé peu actif dans les transports urbains sur rails, emportent le marché du renouvellement des tramways de Genève en proposant un diagramme original



(Photo G. Müller)

Fig. 8. - Genève : le précurseur, rame Vevey/ABB circulant en UM.

jonction d'une troisième caisse intermédiaire reposant sur un bogie Vevey.

Les 12 rames Vevey-Düwag-ABB livrées aux Tramways de Berne en 1989 constituent une extrapolation à trois caisses du modèle genevois. Elles en diffèrent, sur le plan mécanique, par l'adjonction d'une caisse intermédiaire reposant sur deux petits bogies porteurs dotés de roues élastiques Bochum (\varnothing 410 mm). Le débattement en hauteur de ces dernières est dissimulé en partie dans des podiums munis de sièges et, grâce aux articulations flottantes, le plancher est abaissé à 350 mm sur près de 22,20 m, soit 72 % de la longueur utile de la rame ; deux courtes zones extrêmes, y compris celle abritant la cabine de conduite, sont à la cote de 710 mm grâce à l'emploi de roues motrices de \varnothing 560 mm.

Compte tenu du fait que les échanges de voyageurs se font à partir de quais ne mesurant que 160 mm de haut, ou même à partir du plan de la chaussée, il a fallu inclure, à chacune des six doubles portes, une marche intermédiaire rabattable s'ouvrant à la cote de 210 mm ; la réalisation est cependant ingénieuse, la construction d'un niveau de qualité élevé et les frais d'entretien de ce matériel sont allés au-delà des espérances de son exploitant.

Ne pouvant arriver à un accord satisfaisant aboutissant à la réalisation d'une version à voie métrique du matériel grenoblois, le réseau de Saint-Étienne passe commande aux Ateliers de Vevey d'une première tranche de 15 rames unidirectionnelles à deux caisses mises en service en 1991-1992, et qui sont une extrapolation du tram de Berne auquel on emprunte les bogies moteurs à roues



(Photo S. Zalkind)

Fig. 9. - Le nouveau matériel articulé Vevey/Alsthom de Saint-Étienne.

de 560 mm et le petit bogie porteur à roues de 410 mm ; celui-ci est placé à l'arrière de la caisse avant et ses roues émergent quelque peu du plancher à l'intérieur d'un caisson surmonté de sièges disposés dos-à-dos. Comme à Berne, le plancher bas, qui avoisine 60 % de la surface intérieure disponible, est à la cote de 350 mm, les zones situées sur les bogies moteurs étant à 710 mm au-dessus des rails ; là encore, en raison du niveau des quais des stations situés à 170 mm, l'accès de plain-pied pour les personnes se déplaçant en fauteuil roulant n'est, pour l'instant, pas possible. La fourniture de l'équipement électrique à hacheur et la finition intérieure ont été confiées à Alsthom.

Des variantes de ces modèles sont actuellement en construction pour Magdebourg et Leipzig :

- *Magdebourg* : 120 rames unidirectionnelles à trois caisses (LHB/ABB/Dessau), la caisse médiane reposant sur deux bogies porteurs de 410 mm développés par LHB ; la

motorisation est asynchrone et le plancher remonte à 580 mm au-dessus des deux bogies moteurs.

- *Leipzig* : 35 rames unidirectionnelles, 90 en option (Düwag/Bautzen) ; la caisse médiane repose également sur deux petits bogies porteurs munis de roues folles de 410 mm de diamètre ; les roues motrices et porteuses émergent dans la caisse à l'intérieur de coffres sur lesquels sont disposés des sièges transversaux doubles, ce qui rétrécit notablement le passage en ces points mais offre, en contrepartie, un nombre de places assises important (92).

Dans cette famille de véhicules, les caisses motrices d'extrémité s'appuient et s'articulent sur la caisse médiane qui est, comme à Berne, une remorque à bogies.

Certains réseaux demeurent fidèles à l'exploitation de rames automotrices, auxquelles on attelle une remorque indépendante durant les périodes de pointe.

Réseau	Voie (mm)	Année	N°	Présenta-	Construc-	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Plancher bas (mm)	Places assises	Tarif (FC)	P. (UKW)
Geneve	1 000	1984	38	B'2'B'	Vevey/Düwag ABB	21 000	2 300	480	870	48/70	27,0
Geneve	1 000	1995	18	B'2'2'B'	Vevey/Düwag ABB	30 000	2 300	480	870		2 x 150
Berne	1 000	1990	12	B'2'2'B'	Vevey/Düwag ABB	31 140	2 200	350	710	68/114	34,0
St-Etienne	1 000	1991	15	B'2'B'	Vevey/Düwag Alsthom	23 240	2 150	350	710	43/97	27,5
Magdebourg	1 435	1995	120	Bo'2'2'Bo	LHB/ABB Dessau	29 620	2 300	350	580	70/100	33,0
Leipzig	1 450	1995	35	Bo'2'2'Bo	Düwag/Bautzen ABB	28 100	2 200	350	560	76/90	31,5
Darmstadt	1 000	1995	30	2'2'	LHB	14 720	2 400	350	350	48/44	12,5

Tableau III. - Tramways à plancher bas partiels (2^e génération).

Le réseau d'Oslo a étudié un pareil véhicule destiné à reposer sur deux bogies Vevey, le plancher étant à 320 mm. Un tel type de remorque ultra légère a également été envisagé pour Genève.

Le réseau de Darmstadt met actuellement en service 30 remorques unidirectionnelles (LHB) dont le plancher bas est à 350 mm au-dessus du rail, les sas d'entrée, grâce à une légère inclinaison du plancher, étant eux-mêmes rabaisssés à 290 mm.

L'École de Grenoble :

Le matériel développé initialement pour Grenoble (38 unités, en service) puis adopté par la RATP (17 en service, 17 en construction), Rouen (28 en service), est issu d'un développement M.T.E.-Alsthom-De Dietrich ayant comme origine le matériel de Nantes, dont les bogies monomoteurs et l'équipement de traction ont été reconduits. La construction est en acier.

Les caisses motrices s'appuient et s'articulent autour d'un court module

d'intercirculation, lui-même composé de deux parties articulées selon un axe horizontal ; ce module repose sur un bogie porteur à roues indépendantes, de diamètre identique à celui des roues motrices, logées sous des sièges longitudinaux.

Cette technique permet au plancher, surbaissé à 350 mm, d'être traversant et de s'étendre d'un bogie moteur à l'autre. Il n'y a pas de marche aux entrées et l'ensemble des équipements de traction est disposé en toiture. La partie surbaissée s'étend sur 18 m, soit environ 61 % de la surface utile ! Au-dessus des bogies moteurs, le plancher s'élève à 870 mm.

Le succès du matériel de Grenoble a mis fin à une longue polémique soutenant que les bogies à roues indépendants pouvaient constituer un danger en cas d'enrayage intempestif de l'une des roues.

Sa conception, aujourd'hui quelque peu dépassée, a fait école dans plusieurs cas :

- *Turin* : 54 rames unidirectionnelles (FIAT/Ansaldo), livrées en 1990 ; bogies monomoteurs.

- *Rome* : 60 rames unidirectionnelles (SOCIMI/AEG), construites à seulement 34 exemplaires à ce jour à la suite de la fermeture de SOCIMI (les approvisionnements pour compléter la série attendant un repreneur) ; bogies bimoteurs. Construction des caisses intégralement en aluminium.

- *Brno* : les usines Tatra, plus grand constructeur de tramways du monde, ont vu une partie de leurs clients traditionnels leur échapper après la chute du régime communiste, et sont obligées de présenter un produit innovant pour l'avenir. Un prototype de rame articulée unidirectionnelle à trois caisses, dont la conception et l'allure générale rappellent le matériel de Grenoble, est présenté en 1993 ; le réseau de Brno aurait, entre-temps, commandé six rames de ce type.

- *Valence* : 21 rames unidirectionnelles, conçues par Düwag mais construites en Espagne (CAF 13 et MEINFESA 9), pour le retour du tramway urbain dans cette grande ville ; la courte caisse centrale d'intercirculation, d'un seul morceau, repose sur un bogie à 4 roues indépendantes disposées dans des coffres servant de support à des sièges trans-



(Photo G. Müller)

Fig. 10. – En 1987, le tramway de Grenoble a redonné le blason du tramway en France.



(Photo G. Müller)

Fig. 11. - Les rames SOCIMI/AEG de Rome sont inspirées du modèle grenoblois.

versaux doubles. L'esthétique générale est signée Neumeister, le designer de l'ICE. Dix rames similaires sont en construction pour Lisbonne (Düwag - Sorefame).

Tramways avec bogies porteurs à deux roues indépendantes système EEF

En 1986, sous l'autorité du Ministère fédéral allemand de la Recherche et de la Technique et du VöV, est fondé un groupe de travail regroupant cinq exploitants (Bonn, Düsseldorf, Ludwigshafen, Mannheim, Munich), trois mécaniciens

(Düwag, LHB, Waggon-Union) et quatre électriciens (AEG, BBC, Kiepe, Siemens).

Sa mission est de développer un nouveau modèle de tramway standard, de construction modulaire, avec l'objectif d'abaisser très sensiblement les coûts de construction et les frais de maintenance.

Le futur tramway doit avoir un plancher bas intégral distant de 350 mm du rail. Trois prototypes, se démarquant sur le plan de la conception mécanique, sont livrés en 1993 à Bonn, Düsseldorf et Mannheim (VöV - Stadtbahn 2000).

Afin de pouvoir garantir le plancher bas sur la totalité de la longueur, on fait appel à une technologie particulière étudiée par le Professeur F. Friderich d'Aix-la-Chapelle, les « trains de roues indépendantes auto-régulées » (EEF).

L'histoire des essais, plus ou moins heureux, des tramways à essieux radiants justifierait à elle seule un ouvrage complet.

Dans le cas du projet du Professeur Friderich, l'idée consiste à remplacer les bogies à quatre roues par un train de deux roues indépendantes, motorisées ou non, disposées autour d'un axe vertical situé à

Réseau	Voie (mm)	Année	N°	Transmis- sion	Construc- teurs	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Plancher bas (mm)	Plancher haut (mm)	Places ass/deb	Tarif (fr)	P. (kW)
Grenoble	1 435	1987		B'2'B'	Alsthom/De Dietrich	29 400	2 300	350	860	58/116	44,0	2 x 275
R.A.T.P.	1 435	1992	34	B'2'B'	Alsthom/De Dietrich	29 400	2 300	350	860	-	44,0	2 x 275
Rouen	1 435	1995	28	B'2'B'	Alsthom/De Dietrich	29 400	2 300	350	860	-	44,0	2 x 275
Rome	1 445	1991	60	Bo' 2 Bo'	SOCIMI/AEG + ?	21 100	2 300	350	835	34/104	30,0	4 x 100
Turin	1 435	1989	54	B'2'B'	FIAT/Ansaldo	22 200	2 300	350	870	49/98	30,0	2 x 300
Brno	1 435	1995	6	Bo' 2 Bo'	Tatra	26 300	2 440	350	895	44/106	33,0	4 x 95,2
Valence	1 000	1994	21	Bo' 2 Bo'	Düwag/CAF/ Meinfesa/Siemens	23 800	2 400	350	560	65/96	30,6	4 x 100
Mannheim	1 000	1994	64	Bo 2 Bo	Düwag/ABB	29 200	2 400	350	600	85/102	29,6	4 x 95
Mannheim RHE	1 000	1995	5	Bo 2 2 Bo	Düwag/ABB	40 100	2 400	350	600	120/160	40,2	4 x 95
Dresden	1 435	1995	20	Bo 2 Bo	Düwag/ABB	29 200	2 300	350	600	73/94	28,9	4 x 95
Karlsruhe	1 435	1995	20	Bo' 2 Bo'	Düwag/ABB	28 820	2 650	390	580	90/108	34,3	4 x 125
Cologne	1 435	1995	40	Bo' 2 Bo'	Bombardier/Kiepe	28 400	2 650	400	580	70/110	34,5	4 x 120
Portland	1 435	1995	39	Bo' 2 Bo'	Düwag/Siemens	27 200	2 655	350	980	70/120	44,0	4 x 140
Lisbonne	900	1995	10	Bo' 2 Bo'	Düwag/Siemens/ Sorefame	24 000	2 400	350	700	65/90	44,0	4 x 100

Tableau IV. - L'École de Grenoble.



Fig. 12. - Les 21 rames Düwag/CAF/Meinfesa/Siemens de Valence illustrent le retour du tramway en Espagne.

l'extérieur d'une ligne joignant les points de contact des roues avec les rails et pouvant pivoter autour de cet axe. Les deux roues indépendantes sont reliées par une barre d'écartement, le parallélisme entre les roues et les rails étant maintenu en alignement et en courbe.

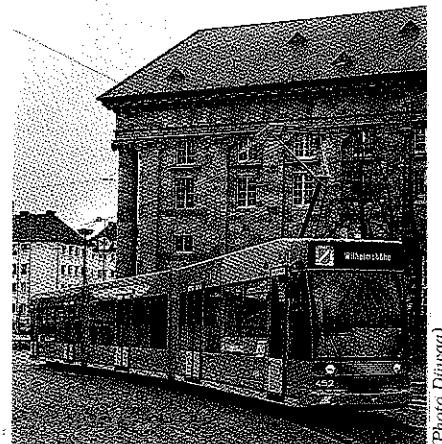
Dans la réalité, le comportement dynamique des trois prototypes s'est montré très laborieux, notamment au niveau des roues motrices qui se sont révélées source de bruit et sujettes à une usure rapide des boudins. Sans que les principes mêmes soient remis en cause, la nécessité impérieuse et urgente, pour de nombreux réseaux ferrés, d'acquérir du matériel neuf, a conduit les constructeurs à proposer des solutions moins révolutionnaires mais susceptibles d'être industrialisées à court terme.

La Société Düwag a retiré la part positive des études du VöV 2000, à savoir le comportement relativement satisfaisant du train à deux roues indépendantes et auto-orientables faisant office de bogie porteur.

Ces « bogies EEF », faute d'une traduction française simple, sont utilisés pour la première fois sur les 25 rames à trois caisses que Düwag/AEG/Siemens livrent à Kassel à partir de 1990.

La caisse centrale repose sur deux paires de bogies EEF et les articulations avec les caisses voisines sont flottantes ; les extrémités avant et arrière de la rame reposent sur un bogie monomoteur. La chaîne de traction est à hacheur GTO.

Le plancher est à la cote de 350 mm sur 18 m environ, soit 63 % de la longueur utile. Trois portes doubles donnent accès à la zone surbaissée, tandis qu'une porte double dessert l'arrière de la rame et qu'une porte simple avec un emman-



(Photo Düwag)

Fig. 13. - Les tramways de Kassel ont utilisé pour la première fois, à grande échelle, les bogies porteurs EEF à 2 roues indépendantes.

gement à 3 niveaux permet l'accès auprès du conducteur des voyageurs devant acheter leur billet à bord du tram. Solution qui avait été envisagée pour Grenoble, puis rejetée en raison du frein au libre-service que représente une porte simple.

Le modèle de Kassel a donné suite à toute une famille de véhicules articulés de conception générale similaire : Bochum (42), Bonn (24), Erfurt (14), Halle (122), Heidelberg (12), Mülheim (4), Oberhausen (6), Rostock (40). Le plancher haut, régnant toujours sur les bogies moteurs d'extrémité, a pu être ramené, entre-temps, à 560 mm ; par ailleurs, la plupart des exploitants cités ont abandonné le principe d'une porte à l'avant pour la perception, sauf à Rostock où Düwag et Bautzen ont utilement remplacé l'emmanchement intérieur par un plan incliné, nettement plus sécuritaire.

Sur tous ces modèles, la chaîne de traction est triphasée asynchrone.

Variations sur le thème grenoblois

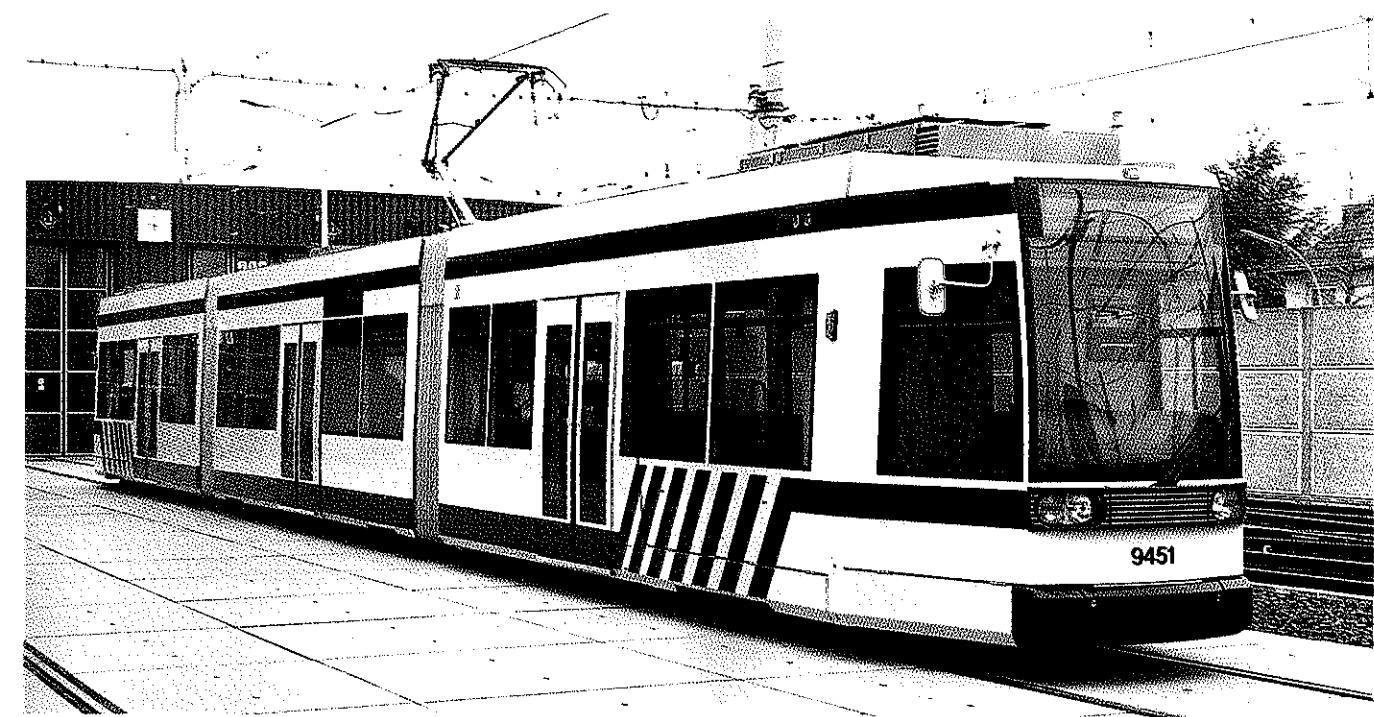
Ne différant fondamentalement du modèle grenoblois qu'au niveau des articulations et du confortable gabarit (2,65 m), sont en cours de construction pour :

- Karlsruhe (ABB) : 20 rames unidirectionnelles ;
- Cologne (Bombardier/Elin) : 40 rames réversibles.

Dans ce dernier cas, une première en Allemagne, les caisses sont fabriquées en Autriche, les bogies en Belgique où est également prévu le montage.

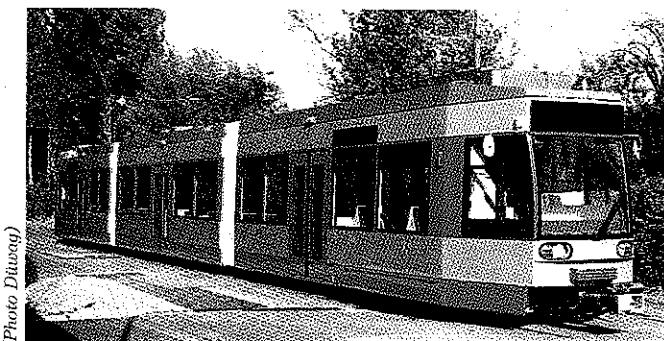
Comparables en conception et dans les dimensions, les 39 rames articulées sont en construction par Düwag et Siemens pour Portland, première ville américaine ayant opté pour le plancher bas. Cent rames viennent d'être commandées à Breda par le réseau MBTA de Boston.

Les rames bicourant (750 V/15 kV 16 2/3 Hz) en construction pour Sarrebruck sont directement inspirées de celles de Sheffield et s'en différen-



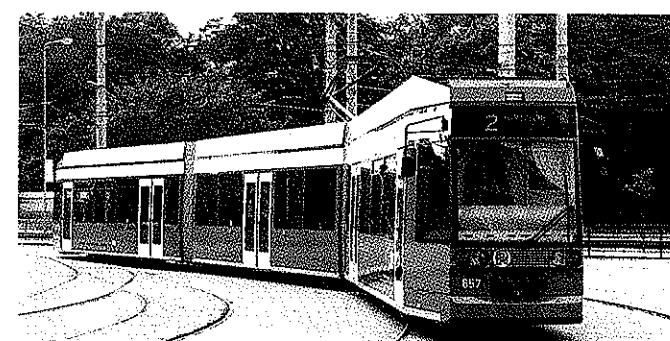
(Photo Dürre)

Fig. 14. - Extrapolés du modèle de Kassel, les nouveaux tramways standard à plancher bas pour voie normale à Bonn...



(Photo Düwag)

Fig. 15. - ... et pour voie métrique à Halle...



(Photo Düre)

Fig. 16. - ... tandis que Rostock prévoit une porte à l'avant pour les voyageurs sans titre de transport.

Réseau	Voie (mm)	Année	N	Transmis- sion	Construc- teurs	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Plancher bas (mm)	Plancher haut (mm)	Places ass/déb. (4 v/m ²)	Tare (t)	P (kW)
Kassel	1 435	1990	25	B'1'1'B'	Düwag/AEG/ Siemens	28 700	2 300	350	700	80/110	30	2 x 180
Bonn	1 435	1994	24	Bo'1'1'Bo'	Düwag/Siemens	28 570	2 300	350	560	70/118	31	4 x 105
Halle	1 000	1993	122	Bo'1'1'Bo'	Düwag/Siemens	28 520	2 300	350	560	68/120	30	4 x 105
Rostock	1 435	1994	40	Bo'1'1'Bo'	Düwag/Bautzen/ ABB/Siemens	30 100	2 300	350	560	90/96	31	4 x 95
Düsseldorf	1 435	1995	10	Bo'1'1'Bo'	Düwag/Kiepe	28 210	2 400	290/350	560	78/90	30	4 x 105

Tableau V. - Tramways à bogies porteurs système EEF.

cident essentiellement, outre l'appareillage électrique, par la longueur. Une version tricourant, pour parcourir les lignes 25 kV 50 Hz, est à l'étude.

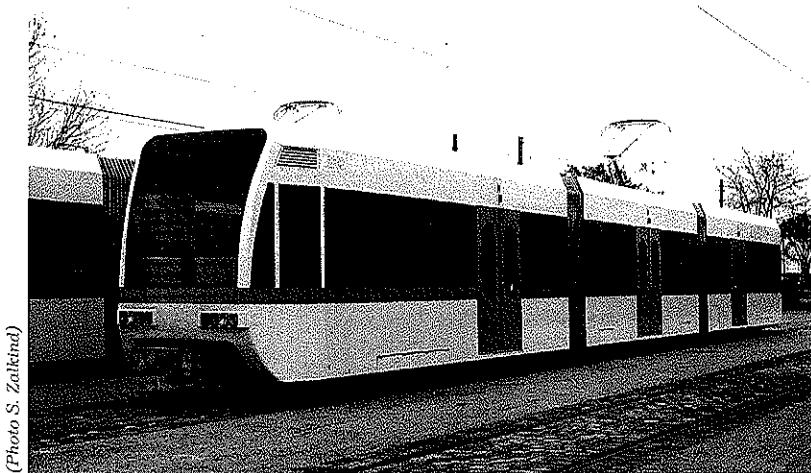
Les 68 rames, construites pour la Stadtbahn de Vienne par Bombardier/Düwag/Kiepe/Elin sont une série très réussie de véhicules au gabarit

de 2,65 m. Chaque élément, long de 27 m, est composé de 3 caisses : la caisse centrale repose sur deux courts bogies à un essieu dont l'orientation, en courbe, est commandée par l'orientation relative de la caisse voisine ; les articulations sont flottantes.

Les caisses d'extrémité reposent, au niveau du nez, sur un bogie bimo-

teur conçu par Düwag. Le plancher est à 440 mm sur près des deux tiers de la rame, puis remonte, par l'intermédiaire d'un plan incliné, pour culminer à 530 mm au-dessus des bogies moteurs.

Dans la catégorie des rames modulaires, notons encore les 64 unités à 5 caisses en cours de fabrication



(Photo S. Zalkind)

Fig. 17. - Les nouvelles rames de la Stadtbahn de Vienne.

(Düwag) pour le réseau de Mannheim, qui a choisi des bogies bimoteurs à moteurs transversaux triphasés asynchrones (ABB) disposés dans les modules d'extrémité nécessitant, à l'abord de ceux-ci, une marche ; le bogie médian est à roues folles (\varnothing 600 mm) qui émergent sous des sièges.

Cinq rames à sept caisses, longues de 40,10 m, les plus longues du monde, sont en cours de livraison pour la ligne interurbaine Mannheim - Bad Dürkheim exploitée par le réseau de Ludwigshafen.

Les tramways à plancher bas intégral

Les modèles de tramways à plancher bas partiel ayant très vite fait

apparaître leurs inconvénients, il était logique que la plupart des constructeurs tentent d'aller plus loin dans la logique du développement technique, pour aboutir à des solutions à plancher bas intégral, c'est-à-dire sur toute la longueur du véhicule accessible aux voyageurs.

Le premier véhicule de ce genre est réalisé par Socimi à Milan en 1989. Il s'agit d'un véhicule-laboratoire réalisé en un temps record afin de valider les éléments les plus délicats, les bogies.

Le véhicule est une automotrice unidirectionnelle simple de 14 m de long, dont la plupart des éléments de caisse en aluminium et de portes sont prélevés sur la chaîne de trolleybus construite par les usines Macchi de Varese, filiale de Socimi.

Chaque bogie est formé d'un plateau surbaissé doté de boîtes d'essieu supportant 4 roues indépendantes, surmontées chacune d'un moteur de traction à courant continu entraînant la roue motrice correspondante par l'intermédiaire d'un réducteur.

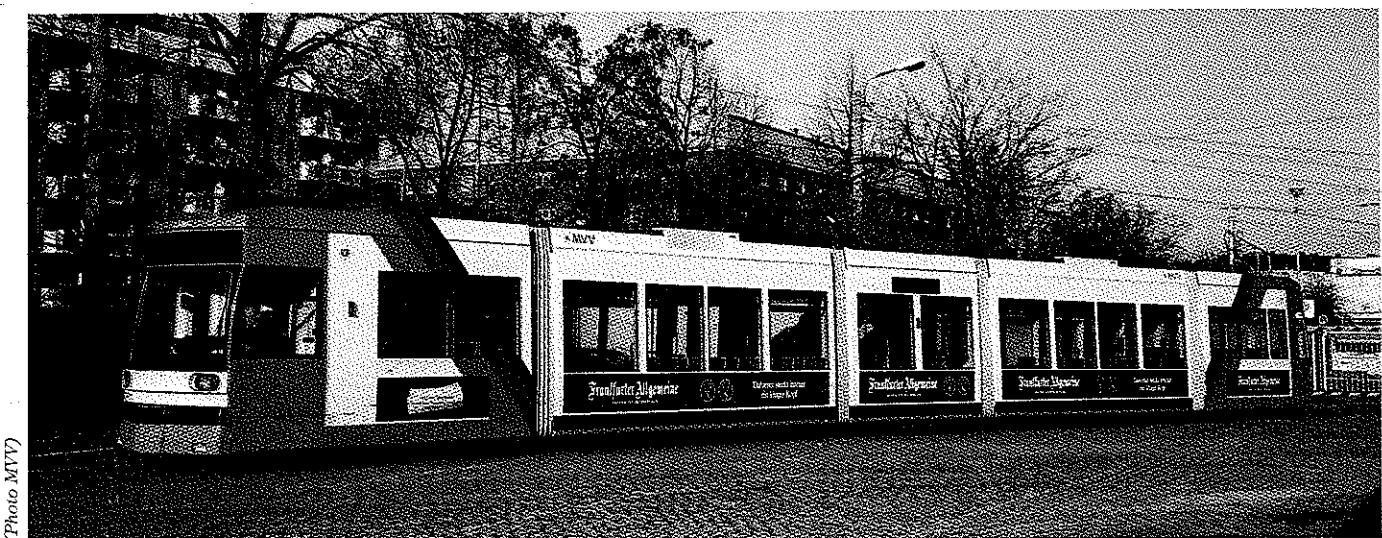
Les équipements de puissance et les auxiliaires sont répartis à l'intérieur de la caisse sous des banquettes longitudinales, formule courante en Italie.

L'ensemble est assez rustique mais fonctionne parfaitement et, surtout, le comportement général de la motrice, et sa facilité d'inscription dans des courbes de 15 m de rayon, seront des éléments qui décideront la Communauté Urbaine de Strasbourg et la C.T.S. à choisir pour un matériel de cette catégorie.

En Allemagne, le grand constructeur ferroviaire nurembergeois M.A.N. GHH, absorbé entre-temps par A.E.G., travaille également à des solutions de matériels à plancher bas intégral.

Comprenant qu'il vaut mieux aborder le problème avec un exploitant dynamique, M.A.N. GHH s'attache les compétences des Tramways de Brême.

Ceux-ci, qui avaient développé à la fin des années cinquante une famille particulièrement réussie de motrices articulées et de remorques articulées à deux caisses et sur deux bogies seulement, transforment, en pre-



(Photo G.W. Müller)

Fig. 18. - Les nouvelles rames à plancher bas de Mannheim (Düwag/ABB, 1995) ont frappé l'opinion par leur confort et leur silence.

mière étape, l'une de leurs unités les plus récentes en rame automotrice à trois bogies, afin de valider le comportement dynamique d'un tel ensemble.

En 1990, M.A.N. GHH présente à Brême un prototype, dérivé du précédent, mais dont le plancher est rabaisse à 350 mm sur toute la longueur de la rame avec des emmarchements s'inclinant même à 300 mm.

Chaque caisse repose en équilibre sur un bogie à adhérence partielle de configuration (1A), composé d'une paire de roues folles et d'une paire de roues motrices ; celles-ci sont reliées entre elles, de façon rigide en torsion, par l'intermédiaire de réducteurs à engrenages droits marchant parallèlement, et d'un arbre transversal surbaissé pourvu d'accouplements rigides en rotation. L'un des réducteurs est relié, par un arbre à cardans, à un moteur de traction situé dans le plancher de la caisse et dissimulé sous des sièges du compartiment. Les moments de gauchissement entre les deux roues motrices sont transmis par les réducteurs à engrenage droit et par l'arbre transversal rigide en torsion, lequel est fortement démultiplié vers les roues motrices. Les accouplements à l'arbre transversal servent à compenser les mouvements élastiques et les tolérances longitudinales entre les réducteurs.

Le châssis du bogie est sollicité asymétriquement par déport longitudinal des ressorts de la suspension secondaire, et le poids adhérant au niveau des roues motrices est de l'ordre de 64 %. La charge verticale, les mouvements latéraux et de rotation sont repris par la suspension secondaire, les efforts de traction étant transmis à la caisse par une paire de bielles.

Les trois caisses, identiques dans leurs dimensions principales, sont reliées entre elles par des articulations. Alors que la voiture de tête A ne peut pivoter, par rapport à la partie centrale, qu'autour de l'axe Z, le point d'articulation entre la caisse médiane B et la caisse de queue C présente un degré de liberté complémentaire permettant aussi de pivoter autour de l'axe Y.

Le 25 novembre 1994, Mme Catherine Trautmann, maire de Strasbourg, inaugure le nouveau réseau de tramways de Strasbourg, mis en service le lendemain avec une fréquence réduite (et maintien provisoire des services d'autobus parallèles), la totalité du parc du matériel roulant nécessaire n'étant pas alors livrée (la ligne de tramways de Strasbourg est maintenant pleinement opérationnelle depuis le 27 février 1995). En prélude au tramway, dès 1992, l'équipe municipale avait mis en application, avec courage et détermination, un nouveau plan de circulation en centre ville éliminant la circulation de transit.

Trois semaines plus tard, le 17 décembre 1994, c'était au tour de M. Laurent Fabius, président du Sivom de l'agglomération rouennaise, d'inaugurer le réseau de tramways de Rouen aussitôt mis en service.

Dans ces deux villes il s'agit d'une ligne à voie normale, longue de 9,8 km à Strasbourg et de 11,2 km à Rouen (deux branches vers Sotteville et Grand-Quevilly), comportant une section en tunnel (respectivement 1,2 km et 1,8 km). À Strasbourg comme à Rouen, un prolongement doit être mis en service dans moins de deux ans.

Ces deux réseaux sont bien sûr dotés de matériel à plancher surbaissé :

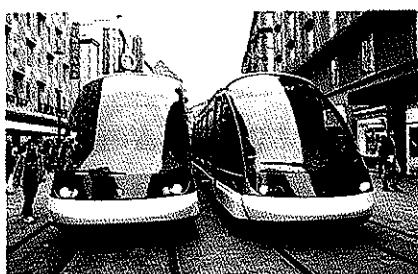
- Eurotram à plancher bas intégral à Strasbourg, l'un des matériels les plus modernes du monde ;
- rames du type Grenoble à plancher partiellement surbaissé à Rouen.

On notera qu'à Rouen, le tramway est appelé Métro (et même Métrobus avant la mise en service ; ce vocable est maintenant utilisé pour désigner l'ensemble du réseau métro + autobus). Au contraire à Strasbourg, on appelle le tramway par son nom, affirmant ainsi la continuité avec l'ancien réseau supprimé en 1960 ; il est vrai que si le matériel de cette époque était devenu obsolète, il n'en était pas moins parfaitement entretenu, de même que la voie, et a assuré un bon service jusqu'au dernier jour, conservant alors une image positive auprès de ses utilisateurs.

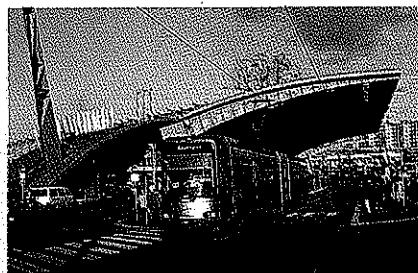
S'ajoutant aux trois réseaux ayant échappé à la vague de suppressions des années 1950-1960 (Lille, Marseille, St-Etienne), cinq nouveaux réseaux ont vu le jour en France en 10 ans (Nantes, Grenoble, Bobigny-St. Denis, Strasbourg et Rouen). Un tel Tramway-boom n'a d'équivalent dans le monde qu'aux Etats-Unis.

La position relative des points d'articulation par rapport à la voie est déterminée par l'équilibre des forces des trois paires de ressorts secondaires au niveau X-Y.

Ce matériel à grande capacité, premier du genre à plancher bas intégral - si l'on excepte les podiums abritant les moteurs de traction, servant d'assise à un groupe de sièges - connaît immédiatement un très grand succès et représente, à ce jour, la plus grande famille de tramways



Tramway de Strasbourg le 25 novembre : les quatre rames inaugurales, deux de deux de front, s'avancent majestueusement.



Métro de Rouen : le terminus de l'Hôtel de Ville de Sotteville.

articulés à plancher bas intégral exécutée pour la voie normale (N) ou la voie métrique (M) :

- Brême (N) 1 rame à 3 caisses/ 3 bogies,
- Brême (N) 78 rames à 4 caisses/ 4 bogies + 30 en option,
- Munich (N) 73 rames à 3 caisses/ 3 bogies + 45 en option,
- Berlin (N) 120 rames à 3 caisses/ 3 bogies + 80 en option,
- Nuremberg (N) 40 rames à 3 caisses/ 3 bogies + 14 en option,





Fig. 19. - La première rame allemande à plancher bas intégral est apparue à Brême en 1990 et a préfiguré une importante filiation.

- Augsbourg (M) 11 rames à 3 caisses/3 bogies,
- Brunswick 12 rames à 3 caisses/3 bogies + 26 en option,
- Francfort-sur-Oder 8 rames à 3 caisses/3 bogies + 5 en option,
- Iéna (M) 10 rames à 3 caisses/3 bogies + 20 en option,
- Iéna (M) 8 rames à 4 caisses/4 bogies,
- Mayence (M) 10 rames à 3 caisses/3 bogies + 10 en option,
- Zwickau (M) 12 rames à 3 caisses/3 bogies,

Les rames à voie métrique destinées à Mayence et à Iéna sont bidirectionnelles, ce qui a compliqué la conception du matériel mais, avec le temps, le logement des moteurs de traction a été optimisé et les podiums ont pu progressivement être éliminés.

Le groupement Siemens/Düwag a également développé pour Francfort-sur-le-Main, en collaboration avec ce réseau, un matériel à plancher bas intégral dont 100 exemplaires sont en construction.

Chaque rame, réversible, est constituée de 3 caisses, celles d'extrême reposant sur un bogie moteur médian, la caisse médiane étant en équilibre sur un bogie porteur à roues folles de 590 mm.

Chaque roue de chacun des bogies moteurs est munie d'un moteur-roue de 55 kW, refroidi par eau, avec entraînement planétaire. La transmission des efforts de traction se fait par deux barres d'entraî-

nement et quatre butées élastiques. Les roues motrices et porteuses pénètrent dans les compartiments et sont cachées par des podiums recouverts de sièges.

On en arrive à présent aux séries de matériels à plancher bas intégral, de conception modulaire, sans aucun obstacle, marche ou podium à l'intérieur des compartiments.

Devant la nécessité de rénover son matériel articulé Düwag, acquis d'occasion au début des années 80 pour remplacer les 28 véloces motrices Brissonneau & Lotz/Alsthom de 1950, souffrant d'une capacité trop réduite, les Tramways Lille-Roubaix-Tourcoing (le célèbre Mongy) portent

leur choix sur 24 rames à voie métrique construites par Breda et équipées par A.E.G.-Westinghouse.

La conception générale est dérivée d'un prototype essayé, dès 1990, à Rome.

Chaque élément se compose de quatre courtes caisses articulées, construites en aluminium, articulées entre elles et pourvues d'un plancher surbaissé uniformément à 350 mm. Les articulations s'appuient sur un faux essieu surbaissé muni de deux roues folles.

Les deux caisses d'extrême reposent chacune sur un bogie monomoteur muni d'un moteur asynchrone.



(Photo G. Müller)

Fig. 20. - Le petit réseau à voie métrique d'Iéna a mis en service une importante série de matériel AEG (qui a absorbé MAN-GHH) en 1994/1995.



Fig. 21. - Le matériel de Francfort sur le Main est le premier à plancher bas intégral construit par DÜWAG/Siemens.

(Photo Düwag)

On peut simplement regretter que le constructeur ait choisi la solution consistant à résérer des sections importantes des compartiments d'extrémité pour y entreposer l'appareillage électrique de puissance et des auxiliaires, au lieu des les disposer en toiture. Les conditions de maintenance sont peut-être plus simples, mais la possibilité pour les voyageurs de disposer d'une vue vers l'avant, attrait inhérent à tout tramway moderne, est ainsi supprimée.

Pour l'exploitation, ce beau matériel, dont l'esthétique générale est signé Pininfarina, est modulaire et pourrait être rallongé d'un module intermédiaire pour augmenter sa capacité.

Type Strasbourg « Eurotram » ABB

Il s'agit ici du matériel le plus sophistiqué dans la catégorie des tramways modernes à plancher bas. Il est le résultat d'un long travail de réflexion entre son acquéreur, la C.T.S., ses consultants et maîtres d'œuvre METRAM et IDPO-Ph. Neerman, et son constructeur ABB.

Une rame, réversible, est constituée de quatre petits modules, montés sur des bogies à faible empattement (1 400 mm) entre lesquels sont suspendus et articulés trois grands compartiments voyageurs, les modules d'extrémité étant aménagés en cabine de

conduite : trois bogies sur quatre sont moteurs.

Grâce à l'absence de porte-à-faux, il a été possible de porter la largeur du véhicule à 2,40 m, par rapport aux 2,30 m de Nantes, Grenoble, etc., pour un gabarit dynamique identique.

Lorsque le niveau de trafic le rendra nécessaire, il est prévu d'augmenter la capacité de chaque rame en rajoutant un module sur bogie moteur et un compartiment intermédiaires. L'équipement électrique est disposé en toiture et chaque compartiment est pourvu de l'appareillage le concernant.

Les châssis sont réalisés en profilés extrudés d'aluminium fournis par Alusuisse, soudés mais recouverts extérieurement de panneaux en polyester assurant une protection du train contre les chocs avec des véhicules routiers.

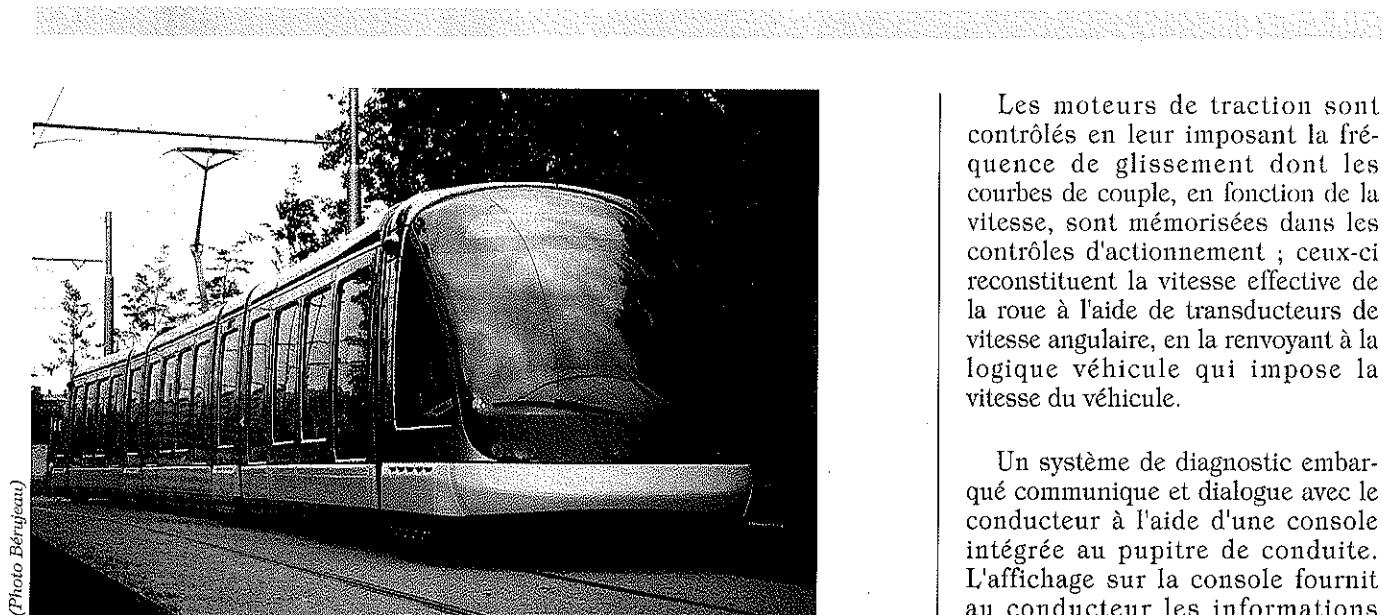
Les bogies moteurs et porteurs sont identiques. Chaque bogie est formé d'un plateau surbaissé supportant quatre boîtes d'essieu intérieures munies de roues SAB indépendantes. Chaque roue est entraînée par un moteur de traction triphasé asynchrone, refroidi par eau, accouplé à un réducteur, le tout étant monté sur un bras articulé ; la suspension primaire est en caoutchouc, la suspension secondaire pneumatique.

Grâce à cette conception originale, il a été possible de prévoir le plancher



Fig. 22. - Une des nouvelles rames Breda de Lille.

(Photo BREDA)



(Photo Béruean)

Fig. 23. - L'Eurotram (ABB) de Strasbourg (1994/1995) est le matériel le plus raffiné produit à ce jour.

bas (350 mm) sur toute la longueur du véhicule, y compris au travers des bogies moteurs ; seul le plancher des deux cabines de conduite a été surélevé afin de procurer au conducteur une meilleure visibilité sur l'environnement opérationnel.

Pour la première fois en France, un tramway moderne est doté intégralement d'un système d'air conditionné, afin d'en augmenter son confort et son attractivité.

Les 12 moteurs de traction tétrapolaires, triphasés asynchrones de 26,5 kW de puissance unihoraire, sont refroidis par eau, ce qui a concouru à leur conférer un volume et une masse relativement réduits. Les

12 moteurs sont alimentés par 6 onduleurs transistorisés à 3 points, chacun d'entre eux pilotant 2 moteurs d'une même file de rail pour chaque bogie moteur, afin de s'affranchir du problème de glissement entre roues opposées durant les passages en courbe ; le comportement en ligne a corroboré la justesse de ce choix.

Le contrôle des séquences traction-freinage est du type MICAS-S, développé par ABB, entièrement modulaire, d'une capacité de traitement très élevée, permettant l'emploi de plusieurs microprocesseurs sur le même bus⁽¹⁾.

⁽¹⁾ NDLR : bus = ligne de transmission commune.



(Photo G. Müller)

Fig. 24. - Bogie moteur de l'Eurotram (ABB) de Strasbourg.

Les moteurs de traction sont contrôlés en leur imposant la fréquence de glissement dont les courbes de couple, en fonction de la vitesse, sont mémorisées dans les contrôles d'actionnement ; ceux-ci reconstituent la vitesse effective de la roue à l'aide de transducteurs de vitesse angulaire, en la renvoyant à la logique véhicule qui impose la vitesse du véhicule.

Un système de diagnostic embarqué communique et dialogue avec le conducteur à l'aide d'une console intégrée au pupitre de conduite. L'affichage sur la console fournit au conducteur les informations exactes pour l'utilisation optimale de la rame en toute circonstance, et l'application, en langage clair, des mesures à prendre pour continuer la marche. Les événements des derniers 20 kilomètres et les défauts, enregistrés sur mémoire rémanente, peuvent être transmis en clair et de manière détaillée sur une imprimante.

L'aménagement de la cabine de conduite a fait l'objet d'études ergonomiques qui n'ont pas de précédent au monde pour un matériel de cette catégorie. Le manipulateur traction-freinage et les boutons de service des portes sont regroupés sur les accoudoirs du fauteuil, doté de mailles en fibre de carbone, et le conducteur peut rapprocher ou éloigner le plancher incliné afin de trouver l'assise qui lui convient.

Les rétroviseurs classiques ont été remplacés par un efficace système de rétrocision, utilisant des microcaméras disposées en haut de caisse.

Tel qu'apparu en juin 1994 aux yeux médusés de la population strasbourgeoise, le matériel roulant du nouveau tramway de Strasbourg a pris une avance technologique sur ses pairs. Il symbolise le résultat d'une étroite collaboration entre les élus, qui l'ont voulu très beau, transparent et rassurant, l'exploitant (CTS), qui avait des idées bien arrêtées sur la manière de l'exploiter et de l'entretenir, le maître-d'œuvre GETAS, qui s'était attaché les talents expérimentés et imaginatifs de METRAM et d'IDPO Ph. Neerman & Co.

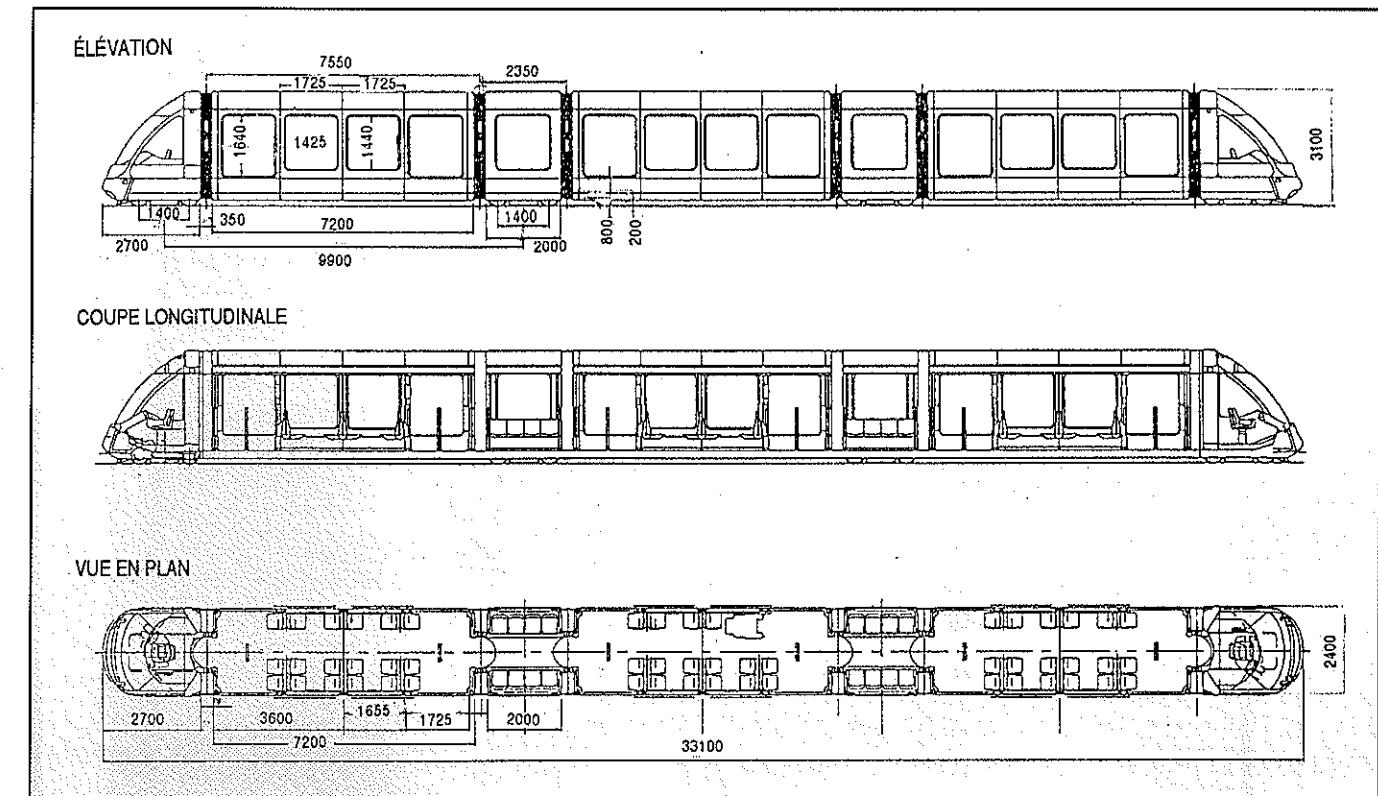


Fig. 25. - L'Eurotram (ABB).

Le Variotram ABB

Il s'agit d'un développement parallèle au précédent, destiné aux marchés anglo-saxons. Une rame prototype a été réalisée, en un temps record, par ABB et livrée, fin 1993, au réseau à voie normale de Chemnitz et huit sont commandées pour Sydney.

On retrouve la conception de modules montés sur bogies encadrant des grands compartiments articulés entre les modules. À la différence de l'Eurotram, le Variotram a des extrémités formées de modules standards auxquels sont ajoutés, en porte-à-faux, une plate-forme d'entrée et le poste de conduite, cette disposition permettant la perception des titres de transport auprès de l'agent de conduite.

Le Variotram peut être construit pour des gabarits de 2,40 m à 2,65 m, dans différentes configurations de longueur.

La construction des caisses fait appel à l'acier, mais les parties extérieures, situées au-dessous des baies, sont constituées de panneaux d'aluminium ou de polyester, collés, séparés par des joints sil-

icone, facilement interchangeables en cas d'accident.

La clé de voûte du Variotram est naturellement le bogie, conçu pour la voie normale ou la voie métrique (deux rames ont été commandées par le réseau interurbain OEG qui relie Mannheim à Heidelberg), avec un empattement de 1 800 mm.

Afin de gagner de la place, ABB a adopté la solution du moteur-roue pour le Variotram. Chaque roue motrice est flanquée, à l'extérieur du châssis, d'un moteur de traction triphasé asynchrone, refroidi par eau, sans réducteur intermédiaire. Le corps de la roue est fixé directement sur la carcasse du rotor.

Relevant d'une conception similaire au Variotram d'ABB, dont une partie des études est commune (notamment les bogies ABB), il faut encore mentionner les 20 rames en cours de construction chez LHB/Siemens pour le réseau à voie métrique de Würzburg. Les rames sont également à cinq caisses, le module intermédiaire et les deux modules d'extrémité reposant chacun sur un bogie moteur (4 moteurs-roues de 50 kW par

bogie) ; le plancher est à la cote de 350 mm mais s'incline jusqu'à 300 mm au niveau des portes.

Les 51 rames articulées de Bruxelles sont une curiosité technique qui n'a pas son équivalent ailleurs. Chaque élément se compose de deux caisses s'appuyant, aux extrémités opposées, sur deux bogies BN à roues inégales, et vers le centre sur un court module d'intercirculation disposé sur un bogie moteur Alsthom à roues égales ; les articulations sont flottantes.

Les bogies d'extrémité sont un parallélogramme déformable en courbe doté de deux roues motrices (\varnothing 640 mm) indépendantes et orientables et de deux roues porteuses (\varnothing 375 mm) ; les roues motrices reprennent 75 % de la charge du véhicule.

Le bogie central est fixé sous le module d'intercirculation. Ses quatre roues et les roues motrices des bogies d'extrémité sont dotées de moteurs triphasés, asynchrones, refroidis par eau, placés face au moyeu des roues, avec réducteur à engrenages épicycloïdaux.



Fig. 26. - Le Variotram construit par ABB, ici à Chemnitz, est destiné aux villes d'Europe centrale et d'Europe du Nord.

Les solutions sont astucieuses, mais les roues motrices émergent à l'intérieur du véhicule et nécessitent la présence de podiums qui resserrent le couloir à leur hauteur.

Développements divers en cours

Le système *Cobra*, développé par S.I.G. et Schindler Waggon (CH), à l'intention des réseaux suisses, est un projet qui se veut particulièrement adapté aux lignes sinuées et accidentées des villes de ce pays.

La construction est modulaire, mais le véhicule de base est une rame à trois caisses avec articulations flottantes ; les deux caisses d'extrémité reposent sur un châssis équipé de roues indépendantes entraînées, deux par deux par file de rail, par un moteur de traction triphasé, suspendu au châssis, avec entraînement par cardan. L'inscription en courbe des roues indépendantes, orientables, est assurée par un pont coudé, surbaissé, reliant les roues par paires.

Parmi les développements résolument non-conventionnels, il faut citer le matériel en construction pour

Vienne et développé par SGP, Elin, Siemens, le réseau lui-même et Porsche pour le design.

Les tramways de Vienne sont le troisième réseau du monde par ordre d'importance ; ses infrastructures ne sont pas toujours adaptées aux conditions de circulation d'aujourd'hui : de nombreux arrêts, en particulier, sont dépourvus de plate-formes et les voyageurs doivent monter dans les rames depuis la chaussée.

Il a été étudié un véhicule articulé, totalement modulaire, dont le plancher est à la cote de 195 mm, les nez de porte étant même rabaisés à 155 mm. Une rame est composée de compartiments, mesurant à peine 5 m de longueur, suspendus et articulés à des portiques motorisés abritant deux roues indépendantes entraînées, chacune, par un moteur de traction asynchrone suspendu verticalement sur le réducteur et la roue.

L'ensemble est conçu pour provoquer une orientation radicale progressive des trains de roues dès que la déviation atteint $2\frac{1}{2}^\circ$.

Cent cinquante rames ont été commandées récemment : 50 dans la configuration de 35 m sur 12 roues, dont 8 motrices et 100 rames dans la configuration de 24 m sur 8 roues dont 6 motrices.



Fig. 27. - Les nouvelles rames de Bruxelles sont aussi à plancher bas intégral.

Réseau	Voie (mm)	Année	N°	Transmis- sion	Construc- teurs	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Plancher bas	Plancher haut (mm)	Places ass/deb (4 v/m ²)	Tare (t)	P (kW)
Berlin	1'435	1994	120	(1Ao)'(1Ao)'(Ao1)'	AEG	26'540	2'300	300	360	62/106	29,2	3 x 85
Iéna	1'000	1994	8	(1Ao)'(1Ao)'(1Ao)'(Ao1)	AEG	35'420	2'300	300	360	82/136	38,0	4 x 85
Lille-R-T	1'000	1993	24	B'1'1'1'B'	Breda/AEG	29'600	2'300	350	950	52/115	39,8	2 x 205
Francfort	1'435	1993	20	Bo'2'Bo'	Düwag/Siemens	27'200	2'350	300	350	58/124	33,5	8 x 55
Strasbourg	1'435	1994	26	Bo Bo 2 Bo	ABB	33'100	2'400	350	350	66/160	39,8	12 x 28
Chemnitz	1'435	1993	1	Bo 2 Bo	ABB	31'000	2'650	350	290	78/140	36,8	8 x 40
Bruxelles	1'435	1993	51	A'1'Bo 1'A'	BN/ACEC/Alsthom	22'810	2'300	350	350	32/90	33,7	8 x 45
Würzburg	1'000	1995	20	Bo Bo Bo	LHB/ABB/Siemens	29'500	2'400	300	350	78/116	36,5	12 x 50

Tableau VI. – Tramways à plancher bas intégral.

Il sera intéressant de voir le comportement en service d'un matériel aussi novateur, l'usure de ses composants et son bilan financier en exploitation et en maintenance.

ment une nouvelle génération de matériels très modernes, dont le plancher est surbaissé sur la plus grande longueur du véhicule.

Le but recherché est, comme en service urbain, de diminuer les temps d'arrêt en station en offrant des accès de plain-pied, y compris depuis des quais de faible hauteur construits dans la voirie.

Pour une largeur uniforme de 2,65 m, il en résulte une gamme de véhicules dont la composition répond toujours à la formation de deux motrices à bogies couplées dos-à-dos en permanence. Les bogies moteurs sont fournis par S.I.G. de Neuhausen, l'ensemble des équipements électriques provenant d'ABB.

À ce jour, 22 rames ont été fournies à 3 réseaux interurbains (1992) :

- Aarau (WSB) 7
- Berne-Soleure (RBS) 10
- Bremgarten-Dietikon (BD) 5

Tout ce matériel de configuration Bo'2' + 2'Bo' est à voie métrique, mais comporte des différences dues aux conditions locales d'exploitation :

- tension de ligne de 1 200 V sauf à Aarau (750 V) ;
- les rames BD ont leur compartiment surbaissé réduit d'un tiers par rapport aux autres matériels ;
- la puissance continue est de 160 kW sauf pour Aarau (140 kW) ;
- la vitesse maximale est de 100 km/h, sauf sur Bremgarten-Dietikon où elle est limitée à 80 km/h ;
- 8 rames RBS ont un compartiment de 16 places de 1^{re} classe pour les services express Berne-Soleure.

Afin d'augmenter la capacité de ses rames « express » et leur confort, le RBS a mis en service en 1994/1995 8 remorques intercalaires allégées comportant 18 places assises de 1^{re} classe réparties suivant les schémas classiques de 2 + 1 fauteuil, de part et d'autre du couloir central. Grâce à la puissance de traction installée, la formule à trois caisses, prévue à l'origine, a permis aux rames rapides rallongées de conserver des performances suffisantes pour demeurer dans l'enveloppe des nouveaux horaires.

Tramways interurbains à plancher bas

Si les exploitations par tramways de services suburbains ou interurbains ont malheureusement toutes disparu en France, victimes du lobby automobile et de l'absence d'intérêt des pouvoirs concédants, il n'en est pas de même dans d'autres pays, en Suisse, en Allemagne et en Autriche en particulier, où ce mode de transport a contribué à un développement équilibré et harmonieux des régions.

En Suisse, où de tels réseaux prospèrent autour des grandes et moyennes agglomérations, l'industrie ferroviaire helvétique a mis au point récem-

Matériel Schindler Waggon

Les Usines Schindler ont développé et commercialisé une intéressante famille de véhicules, dont la conception modulaire permet de construire des rames réversibles de deux véhicules. Les éléments de base sont la cabine de conduite, les compartiments situés au-dessus des bogies (880 mm), les plates-formes à plancher surbaissé (390 mm), le grand compartiment central à plancher surbaissé encadré par les deux plates-formes d'accès.



Fig. 28. – Module ultra-surbaissé et portiques motorisés du véhicule expérimental utilisé pour l'étude du nouveau matériel SGP/Porsche/Elin/Siemens des tramways de Vienne.



(Photo Schindler Waggon)

Fig. 29. – La première des 23 nouvelles rames à plancher bas livrées à partir de 1992 par Schindler pour la ligne interurbaine de Berne à Soleure.

Dans la construction des caisses, un allégement maximum a été recherché : utilisation massive de profilés extrudés et de panneaux en métal léger, assemblage par soudage, boulonnage ou collage, de polyester pour la fabrication des bouts d'extrémité, des coffres de toiture, des habillages intérieurs, des sièges, etc.

Les bogies moteurs sont dotés de deux moteurs de traction triphasés asynchrones, disposés transversalement avec leur réducteur et transmission par accouplement élastique par cardan. La suspension secondaire est pneumatique.

Chaque bogie moteur est alimenté par un onduleur à thyristors GTO dimensionné pour le freinage par récupération ; la logique embarquée programmée, asservissant les fonctions de traction-freinage et les auxiliaires, est à microprocesseurs.

Matériel Vevey

La recherche d'une réduction des temps d'arrêt en gare, et le désir de faciliter l'accès à bord aux personnes âgées en villégiature dans la région de Locarno, ont conduit les responsables des réseaux FART (Suisse) et SSIF (Italie), exploitant la prestigieuse liaison internationale à voie métrique dite des « Centovalli », à commander auprès des Ateliers de Vevey 12 rames

articulées réversibles, de ce que l'on pourrait schématiser comme une version interurbaine des tramways urbains genevois.

L'une des caisses repose sur un bogie bimoteur SIG, type RBS/BD/WSB, ainsi que sur un petit bogie porteur Vevey avec roues de 600 mm montées sur essieu ; l'autre caisse repose un bogie moteur identique au premier, et s'appuie et s'articule sur l'extrémité de la caisse précédente.

Le plancher est ainsi abaissé à 530 mm sur 73 % de la surface utile pour les voyageurs, les parties extrêmes surélevées, disposées au-dessus des bogies moteurs, offrant 18 places de 2^e classe ou 12 places de 1^{re} classe suivant les extrémités.

L'équipement électrique est fourni par ABB et est virtuellement identique à celui fourni aux réseaux RBS/BD/WSB : moteurs de traction triphasés asynchrones, autoventilés, onduleurs à thyristors GTO, freinage de service par récupération.

Projet Stadler SLM/ABB

Les réseaux privés interurbains à voie métrique des districts de Langenthal (OSST), Bienna (BTI), Vevey (CEV) et Montreux (MOB) ont étudié, avec le groupement de constructeurs Stadler/SLM/ABB,

un modèle de rame régionale rapide. Dans les grandes lignes, il s'agit d'une conception grenobloise simplifiée, où le module central d'intercirculation serait réservé à l'appareillage électrique de puissance et de contrôle. Les caisses voyageurs, prévues en aluminium, seraient de construction aussi simple et légère que possible, l'objectif étant de réduire considérablement l'écart du coût de production à la place offerte, et entre ce matériel et un autobus articulé de grande ligne.

Et les autres ?

Au terme des réflexions et réalisations exposées ci-avant, on ne peut plus mettre en doute les avantages de la formule du tramway à plancher surbaissé, les modèles à plancher bas intégral étant, naturellement, supérieurs aux autres, en matière d'exploitation, de maintenance, et pour la circulation des voyageurs à l'intérieur des rames.

En France, sur les huit réseaux existants, seul celui de Marseille n'est pas encore doté de matériel à plancher bas.

D'une manière générale, les tramways à plancher bas apportent un gain de productivité important pour

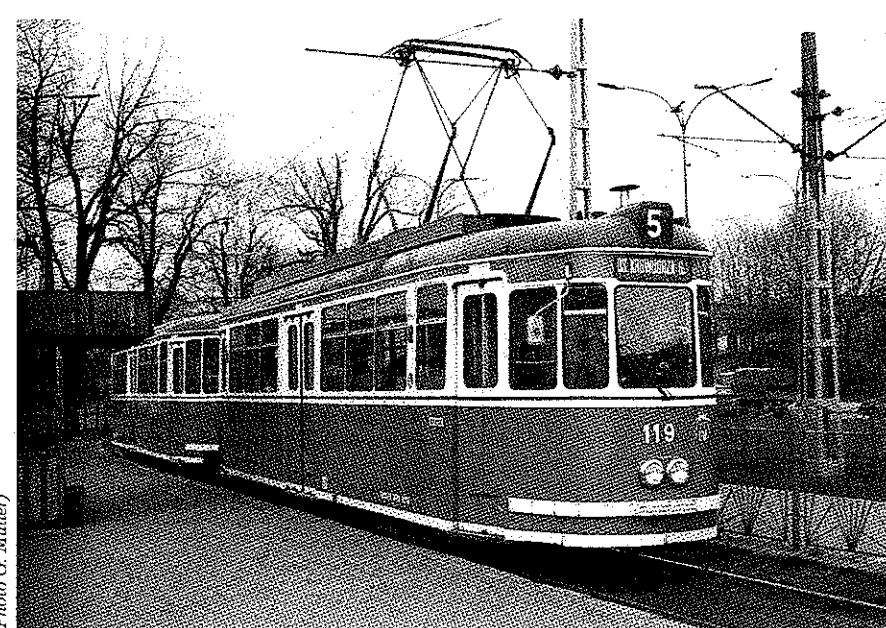
Réseau	Voie (mm)	Année	N	Transmis- sion	Construc- teurs	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Plancher bas (mm)	Plancher haut (mm)	Places ass/deb. (4 v/m ²)	Tare (t)	P (kW)
BD	1000	1992	5	Bo'2' + 2'Bo'	Schindler/ABB	36 390	2 650	390	880	104/128	54,20	4 x 150
WSB	1 000	1992	7	Bo'2 + 2'Bo'	Schindler/ABB	39 300	2 650	390	880	120/140	56,50	4 x 150
RBS	1 000	1992-95	8	Bo'2' + 2'2' + 2'Bo'	Schindler/ABB	59 000	2 650	390	880	180/225	78,55	4 x 150
FART	1 000	1992	12	Bo'2'Bo'	Vevey/ABB	30 300	2 650	530	900	95/85	42,50	4 x 150

Tableau VII. – Tramways interurbains à plancher bas.



(Photo S. Zalkind)

Fig. 30. – Utrecht : la formule de l'accès de plain-pied depuis un quai haut n'est possible que grâce à l'environnement dégagé de cette ligne suburbaine. Le même matériel circule sur les lignes interurbaines de Valence, en Espagne.



(Photo G. Müller)

Fig. 31. – L'arrivée massive en Europe de l'Est de matériels d'occasion rénovés est illustrée ici par des rames MAN ex-Nuremberg cédées à Cracovie.

leur exploitant. Les progrès prévisibles, en matière de miniaturisation des composants et de l'appareillage, conduiront probablement à la généralisation de la formule à plancher bas intégral avant la fin de la prochaine décennie.

On constate que, si ces idées se sont imposées rapidement en Europe occidentale, il n'en est pas de même ailleurs.

En Europe d'abord, où le premier nouveau réseau de tramways, *Utrecht* (1983), a délibérément choisi la formule des quais hauts et l'accès de plain-pied ; ce genre d'installation n'a été possible que grâce à un environnement extrêmement dégagé.

À *Manchester* (1992), la réutilisation massive de lignes de chemins

de fer, reprises aux chemins de fer de l'Etat, a conduit les décideurs, par souci d'économie, à spécifier un matériel articulé à plancher haut desservant principalement des quais hauts, y compris en ville, avec palettes rétractables utilisées, en cas de secours, pour évacuer les voyageurs en dehors des stations.

En Amérique du Nord et centrale, où les nouveaux réseaux de tramways sont nombreux depuis 1978, on est resté à la solution de matériels classiques avec 4 marches d'accès à Baltimore, Buffalo, Denver, Portland, Sacramento, San Diego, San Jose, tandis que l'accès direct par quais hauts est généralisé à Edmonton, Calgary, Los Angeles, St. Louis, Guadalaraja, Mexico et Monterrey. Pour répondre à la loi sur

EN SAVOIR PLUS

- *Modern Tramway, revue mensuelle.*
- *Stadtverkehr, revue mensuelle.*

l'accessibilité des transports publics aux personnes handicapées, les réseaux de la première catégorie ont mis en service, avec plus ou moins de bonheur, des accès par rampe au sol conduisant à une porte de la rame, ou par l'installation d'un hayon élévateur manœuvré par le conducteur.

Seul le réseau de *Portland* a, jusqu'à présent, commandé du matériel à plancher bas, et celui de *Boston* s'ap-

prête à lui emboîter le pas pour diminuer le temps d'arrêt dans les stations souterraines du tronc commun (cent rames sont en construction chez Breda).

Dans le reste du monde, les tramways à plancher bas connaissent un début d'intérêt en Pologne et en Hongrie. Ailleurs, notamment dans les pays d'Europe centrale et en Asie, la situation économique et politique de ces pays fait passer actuellement ces raffinements technologiques à l'arrière-plan ; l'arrivée sur le marché de l'occasion de centaines de véhicules en bon état, en provenance d'Allemagne occidentale, de Suisse et du Bénélux, risque de repousser, pour ces nations, l'arrivée de matériels évolués à une période indéterminée.