

Nantes TAN : arrêt Gare SNCF de 2 rames articulées à 2 caisses.

F. Jeannin:

## Une floraison de nouveaux tramways

(Conférence présentée au Ministère des Transports, Direction des Transports Terrestres, le 16.12.1991)

(Comité de Développement du Tramway)

2778

**Patrice MALTERRE**

Ingénieur Secrétaire Général de l'Office de Coordination de Transports de Marseille

Administrateur des Transports de Marseille, chargé de mission 'Transcet'

23 NOV. 1992

DÉMOCRATISATION  
DU TRANSPORT

**Anne Marie MALTERRE-BARTHES**

Diplômée en Economie des Transports Urbains (Université de Seattle-USA).

### UNE IDÉE NEUVE EN EUROPE

Depuis dix ans le tramway est de retour en France. A Nantes, à Grenoble, à Saint Etienne, ce retour a déjà beaucoup transformé les villes qui, les premières, ont eu l'audace de réorganiser leur réseau de transport autour du tramway. Il en sera de même, dans peu d'années, à Strasbourg, Lille et Rouen. Dès cet été, les Franciliens bénéficieront aussi de ce renouveau des Transports Publics. Elle sera aussi la première grande rocade desservant l'est de la banlieue parisienne. Une seconde suivra, deux ou trois ans plus tard, à l'ouest.

Pour l'Île de France comme pour les villes citées, ce retour est aussi une renaissance. Le tramway français moderne est aujourd'hui à plancher bas accessible aux personnes à mobilité réduite. Il s'insère avec bonheur dans les centres villes qu'il contribue à remodeler. Isolé de la circulation générale sur la plus grande partie de son parcours, il devient la colonne vertébrale de tout le réseau de transport public. Le tramway est, par là même, un élément important de toute politique moderne de la ville. Mais son insertion dans les tissus urbains exige aussi une ferme volonté politique car elle bouscule bien des habitudes et ... quelques intérêts.

Dans l'étude ci-après, Madame Anne-Marie Malterre-Barthes, poursuivant un travail engagé par son mari prématûrement décédé, met bien en évidence la modernité des nouveaux projets de tramway. Elle en montre aussi la dimension européenne qui oblige les industriels concernés à concilier concurrence et coopération.

Comme Saint-Just le disait du bonheur, il y a deux siècles, le tramway est bien redevenu une idée neuve en Europe.

Claude QUIN

Inspecteur Général de l'Equipment.

Il y a une dizaine d'années, alors que le retour du tramway se dessinait dans les pays qui l'avaient abandonné vingt cinq ans plus tôt, paradoxalement l'évolution du matériel roulant se ralentissait. On semblait se rapprocher d'une asymptote technique qui faisait se ressembler, dans leur architecture générale, tous les nouveaux tramways : voitures articulées à deux ou trois caisses, bogies monomoteurs, équipement de traction à hacheur logé sous le plancher, avec bien évidemment d'innombrables variantes de réalisation à l'intérieur de ce schéma.

La version la plus moderne et peut-être aussi la plus réussie de cet "état de l'art" est donnée, à notre avis, par le tramway nantais. Au passage, on doit saluer la performance de l'ingénieur et de l'industrie française d'avoir, du premier coup après trente ans d'absence, pris place dans le peloton de tête des constructeurs mondiaux.

Pourtant ce matériel apparaît, déjà, sinon dépassé, du moins d'un autre temps. Une évolution rapide s'est enclenchée dès la décennie 80 et il est vraisemblable que le tramway de la fin du siècle différera profondément de son si proche et si performant précurseur. Entre eux, il y aura eu une mutation, due à la prise en compte d'exigences sinon nouvelles du moins jusqu'alors ignorées et d'importants progrès techniques ouvrant la voie à des solutions antérieurement impraticables.

La principale exigence d'où tout est venu, c'est de donner aux personnes handicapées - et notamment celles en fauteuil roulant - l'accessibilité aux transports publics. Y satisfaire implique de gommer à la fois la lacune entre le quai et rame ainsi que la différence de hauteur entre le quai d'embarquement et le plancher du véhicule sans marche intermédiaire. Pour les matériels à quai haut (métro, RER, etc...) le problème apparaît ici relativement simple mais c'est celui de la translation entre le quai et la surface du sol qui ne peut être réglé que par des dispositions coûteuses (ascenseurs) ou encombrantes (rampes) (1). Pour les tramways (ainsi que pour les autobus), circulant sur la voirie urbaine, il est le plus souvent inacceptable d'imaginer des quais hauts pour des raisons évidentes d'esthétique et de sécurité. Il faut donc impérativement abaisser le plancher, ou au moins une petite partie de la longueur de la voiture, pour qu'au minimum une porte permette l'accès à partir d'un trottoir de 200 à 250 mm de hauteur (valeur maximale admissible en voirie). Ceci implique un remaniement de l'architecture du véhicule.

Dire que cette exigence a été bien accueillie par les constructeurs et les exploitants serait audacieux. Elle leur a plutôt été imposée par les maîtres d'ouvrage, textes réglementaires à l'appui. Mais dès la mise en service des premiers matériels leur opinion s'est inversée : il est en effet très vite apparu que l'ensemble de la clientèle appréciait vivement la formule et la considérait comme un net progrès : les exploitants se sont de surcroit aperçus que le temps d'échange des voyageurs aux arrêts était réduit et qu'il y avait donc un gain de vitesse commerciale de l'ordre de 5 à 10 % par rapport à un matériel traditionnel (2). Si bien qu'actuellement le plancher bas ne manque pas de chauds partisans, qu'il s'agisse de réseaux nouveaux ou de renouvellement de matériel ancien sur des réseaux existants.

Cette adhésion a eu pour effet d'accroître encore les exigences : au plancher bas se développant sur une partie du véhicule, collectivités locales ou exploitants tendent maintenant à préférer un plancher bas dit "integral" s'étendant sur toute la longueur du véhicule. Quant aux techniciens, la remise en cause quasi totale de l'architecture du véhicule qu'implique le plancher bas intégral les incite à en profiter pour tenter de nouvelles avancées en matière de niveau de bruit, d'usure des roues et des rails en courbe, sur lesquels la technique conventionnelle semblait plafonner.

D'où la floraison de solutions profondément différentes les unes des autres à laquelle nous assistons. Dans la suite de ce travail nous les avons classées par ordre croissant de complexité, ou plus exactement de



Amsterdam : rame à 3 caisses de 1982.  
P. Malterre

## 1 - LA SOLUTION LA PLUS SIMPLE :

### abaisser le plancher entre les bogies sans autre changement

Cette solution a ses lettres de noblesse. Elle a été appliquée dès 1896 (1) sur le métro "Földalatti" de Budapest. En fait le plancher bas n'était pas l'objectif visé, mais la conséquence d'une contrainte géométrique. En effet cette ligne, construite à fleur de sol en tranchée ouverte, passe entre la chaussée et tous les réseaux d'égouts, si bien que la hauteur intérieure du tunnel n'est que de 3,20 m (2,70 m entre niveau du rail et plafond), interdisant donc tout matériel de conception classique.

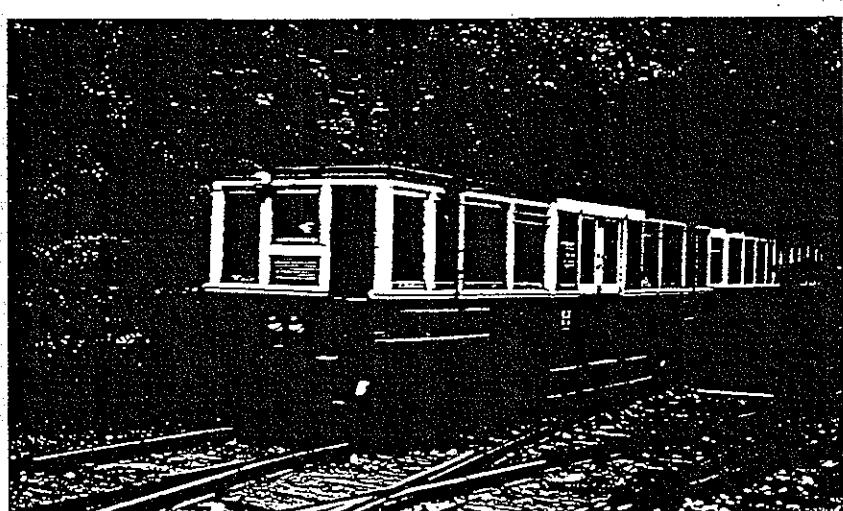
La solution mise en œuvre par les constructeurs (Siemens électricien, Schlich mécanicien) a donc été d'abaisser à 480 mm le niveau de plancher entre les bogies de la motrice. Seule la porte surbaissée était utilisée commercialement. Au dessus des bogies se trouvait l'équipement électrique et pneumatique, ainsi que les loges de conduite (à l'origine les voitures circulaient isolément) où le malheureux mécanicien ne pouvait pénétrer qu'au prix d'une manœuvre acrobatique, la station debout lui étant évidemment impossible. Ces extraordinaires voitures ont circulé, après avoir subi diverses modifications sans incidence sur leur architecture, jusqu'en 1973 et, comme on le verra ci-après, ont été

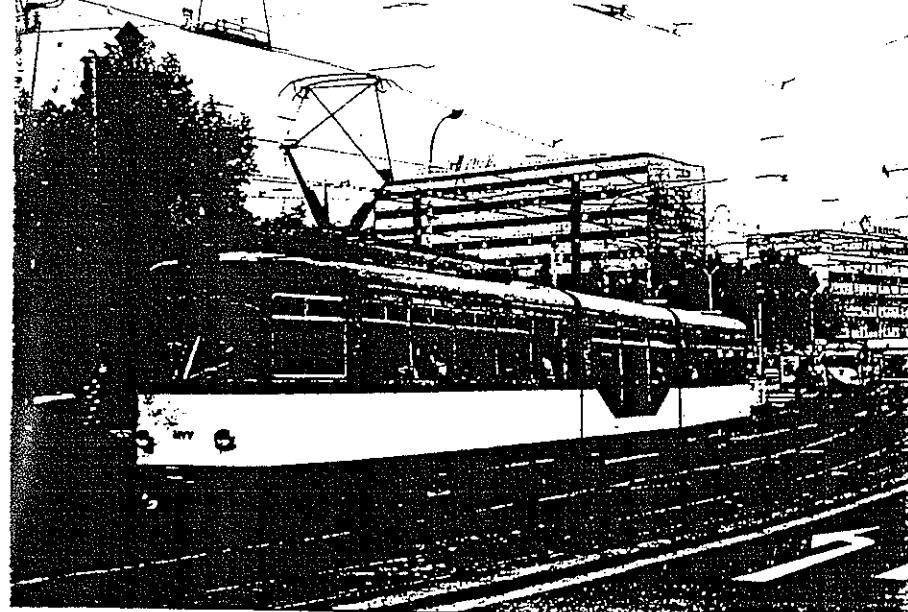
(1) - Sans compter avec les problèmes de sécurité des personnes en fauteuil si une évacuation d'urgence - par exemple en cas d'incendie - doit intervenir en tunnel

(2) Cela a pu être vérifié à Rotterdam pendant l'essai sur ce réseau d'une motrice de Grenoble.

Le "métro" Földalatti de Budapest ancêtre des voitures à plancher surbaissé.

P. Malterre





Mannheim : rame d'origine à 2 caisses dans laquelle est intercalée une caisse centrale à plancher abaissé.

G. Rannou



remplacées par un matériel hongrois tout aussi intéressant.

S'agissant de tramways, avec cette fois le plancher bas comme objectif et non comme conséquence, cette solution a été plusieurs fois tentée, avec plus ou moins de bonheur, par exemple sur des motrices à New York, ou sur des remorques sur plusieurs réseaux allemands après la Première Guerre mondiale suite à des demandes d'associations de mutilés.

On notera à ce propos que la solution est beaucoup plus facile à mettre en œuvre sur des remorques, dépourvues d'équipements électriques ou pneumatiques encombrants, que sur des motrices où il faut reloger ces équipements soit à l'intérieur de la caisse (au détriment de la capacité utile), soit sur la toiture (solution moderne, qui exige des installations d'entretien conçues en conséquence).

Ceci nous amène à l'actualité de cette solution. Elle est en effet aisément praticable sur des rames articulées neuves ou existantes : les deux caisses d'extrémité restent inchangées, de même que les bogies moteurs ou porteurs, et on insère une troisième caisse centrale dont le plancher est abaissé entre les deux bogies qui l'encadrent.

La rançon de la simplicité de mise en œuvre tient dans la faible longueur sur laquelle se développe le plancher bas. Sur la plupart des réseaux anciens, l'entraxe entre

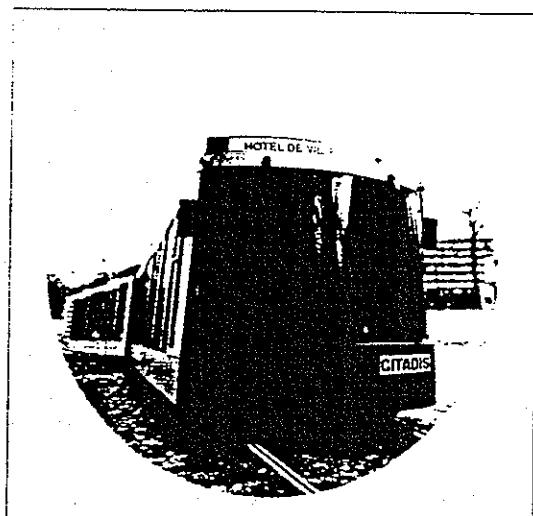
pivots de bogie ne peut dépasser 6 à 7 m pour des raisons d'emprises. Avec un empattement de bogie dont la valeur habituelle est de 1,80 m et si l'on prend en compte la place prise par les deux escaliers de raccordement entre le niveau bas et le niveau haut du plancher, on voit que la partie surbaissée ne s'étend le plus souvent que sur 29,70 m pour les rames à 2 caisses et 40,70 m pour celles à 3 caisses et que seule une porte par face y donne accès. Cela correspond à environ 60% de la longueur totale du véhicule, ce qui revient à dire que 70% des voyageurs (si l'on suppose la voiture pleine) ne bénéficient pas du plancher bas.

A la limite, la solution permet de satisfaire "formellement" à l'exigence de plancher bas.

C'est le cas des matériels récemment mis en service à Amsterdam, Freiburg im Brisgau, Mannheim, Wurzburg, Bâle etc... Nantes a décidé de recourir à cette solution et va ajouter une caisse centrale surbaissée à chacune de ses 34 motrices articulées, mais ici la solution se présente beaucoup plus favorablement puisque l'entraxe entre pivots atteint 10 m ; cela permet d'obtenir plus de 7 m de plancher à 350 mm, avec deux portes par face donnant accès à la zone surbaissée.

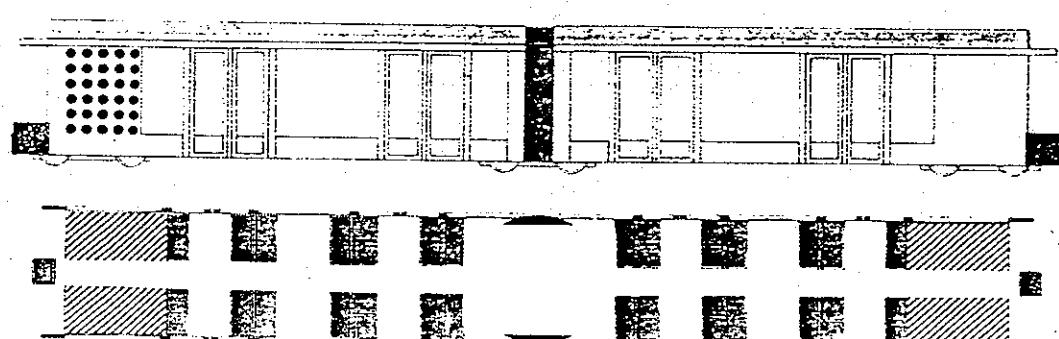
A priori rien ne s'oppose à concevoir des rames articulées dont toutes les caisses auraient un plancher abaissé entre les bogies. C'est ce qui a été fait pour le matériel du "Földallati" de Budapest deuxième génération, qui devait bien entendu respecter la même contrainte géométrique que son précédent de 1896. Ganz a livré en 1973 des rames à trois caisses sur quatre bogies, comportant trois salles voyageurs à plancher bas (480 mm) entre les bogies, sans intercommunication. Au dessus des bogies sont disposés l'équipement électrique et pneumatique ainsi que les loges d'extrémité.

Une solution voisine a été proposée en 1975 par Francorail MTE avec le "Citadis" : entre les bogies, le plancher descendait à la valeur - probablement irréaliste - de 200 mm pour remonter à 750 mm au dessus des bogies de facture classique. L'équipement était logé sur la toiture ce qui permettait en théorie la libre circulation d'une extrémité à l'autre, avec une succession d'escaliers raccordant les deux niveaux de plancher. Présenté au "Concours Cavalié" qui devait définir le tramway stan-



Le système "Citadis", une approche nouvelle du transport urbain en site propre ou partagé, projet de tramway surbaissé proposé au début des années 70 par le CIE Francorail.

Documents collection A. Rambaud



lard français, le projet n'a pas été retenu en raison, entre autres, de ce profil en long torturé... et aussi parce que l'intérêt pour le plancher bas était alors inexistant.

Ce projet a toutefois servi à faire évoluer les idées. Il est bien apparu que, pour les tramways, la formule de la rame articulée devait être conservée mais que, pour disposer d'une longueur de plancher bas non symbolique, il fallait trouver une solution évitant la remontée du couloir au dessus du ou des bogies porteurs centraux.

Signalons pour être complets que si la formule du simple abaissement d'une caisse entre les bogies ne paraît pas appelée à un très grand avenir en raison de ses limites évidentes, elle vient de trouver une application sur des motrices de chemins de fer régionaux suisses (3) où, comme à Nantes, le grand entraxe entre pivots permet de placer deux portes sur la zone surbaissée, l'équipement électrique et pneumatique étant disposé en toiture.

La plus stricte honnêteté intellectuelle oblige cependant à préciser que seules ces solutions, si imparfaites puissent-elles paraître, ont reçu la caution de l'exploitation quotidienne et présentent donc le minimum de risques, pour tous les partenaires intéressés.

## II - UNE DISPOSITION PLUS SOPHISTIQUEE

### ou comment faire passer le plancher au-dessus des bogies : des essieux porteurs

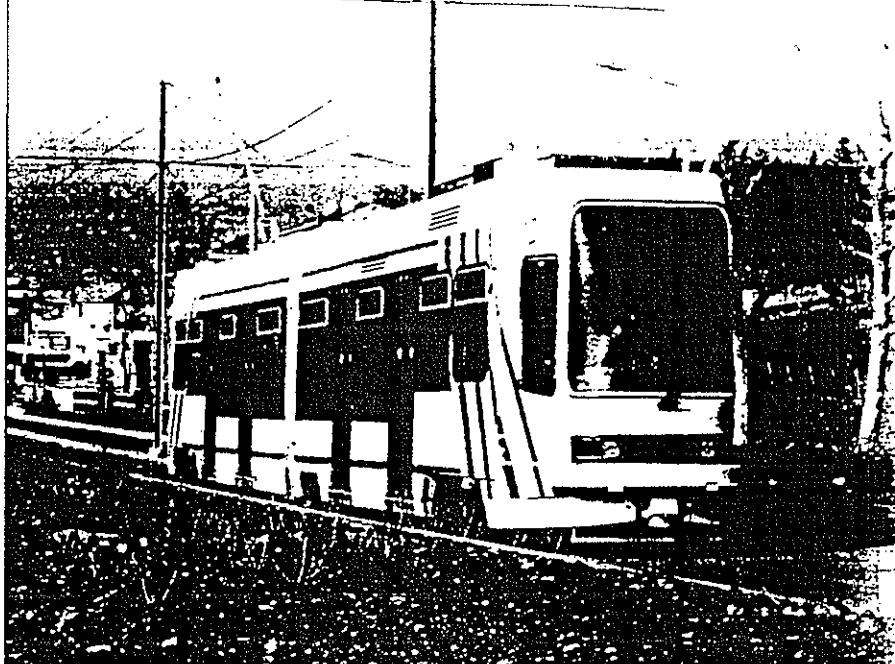
On sait qu'en matière de tramways, la formule de la rame articulée s'est depuis longtemps imposée. Elle a en effet beaucoup d'avantages par rapport aux rames formées de voitures motrices et remorques, attelées sans intercirculation : économie de poids à capacité égale, meilleure répartition des voyageurs, sentiment de sécurité plus fort grâce à la surveillance (au moins théorique) de l'ensemble de la voiture par le conducteur etc... Toujours est-il que constructeurs et exploitants y tiennent.

Pour obtenir une rame articulée dont le plancher soit abaissé et plat sur une longueur appréciable, en acceptant un niveau plus élevé au-dessus des bogies moteurs, il fallait donc trouver une solution qui permette au plancher bas de passer au-dessus du ou des bogies porteurs, traditionnellement placés au droit des articulations maintenant souvent désaxés par rapport à celles-ci, ce qui autorise une meilleure utilisation de l'emprise disponible et donc un allongement de l'ordre de 2 m par rapport à l'ancienne disposition.

En fait, plusieurs solutions ont pu être trouvées rapidement :

a) Bogie porteur à roues de petit diamètre, solution développée par les ateliers de Vevey à partir de leur expérience des trucks porteurs utilisés par divers réseaux régionaux suisses à voie métrique pour acheminer des wagons à voie normale.

b) Bogie porteur à roue de diamètre normal, soit montées folles sur des essieux coudés GEC-Alsthom, solution lourde mais conservant une suspension primaire normale, soit avec des roues de diamètre normal montées folles sur les châssis de bogie (sans possibilité de suspension primaire). Dans les deux cas on se dispense du bogie porteur classique.



c) Remplacement des bogies porteurs par des essieux fixes, orientés en fonction de l'angle des caisses en courbe (système Bréda), soit adoption d'un nouveau système d'orientation de "faux essieux", système "EEF 40" sur lequel nous reviendrons. On ne s'étendra pas ici sur les solutions de Genève (Vevey) et de Grenoble (GEC-Alsthom) puisque ces matériels ont fait l'objet de description détaillée dans cette revue. Par contre on dispose déjà d'un recul suffisant pour pouvoir en apprécier les résultats en service.

C'est ainsi que les préventions manifestées contre les petites roues du bogie Vevey se sont révélées assez largement infondées. Ni le confort, ni le niveau de bruit, ni même les usures de roues ne semblent défavorablement influencés par rapport à un matériel "normal". Cela justifie la confiance mise dans le bogie Vevey - par ailleurs

Saint-Etienne : rame articulée Vevey - Duewag - GEC Alsthom mise en service en 1991.

J. Maher

(3) En dehors des 10 rames Vevey-ABB en construction pour les FART (Centovalli, Locarno-Domodossola) avec bogie central Vevey à petites roues. Schindler livre actuellement 26 rames doubles aux réseaux suivants :

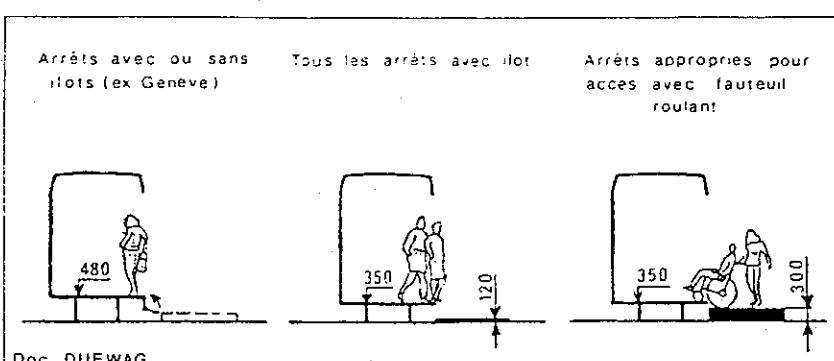
Bramgård - Djelikon (5)

Biel - Tauchalen-Ins (4)

Wyental - u. Shrentalbann (6)

Regionalverkehr Bern - Solothurn (11)

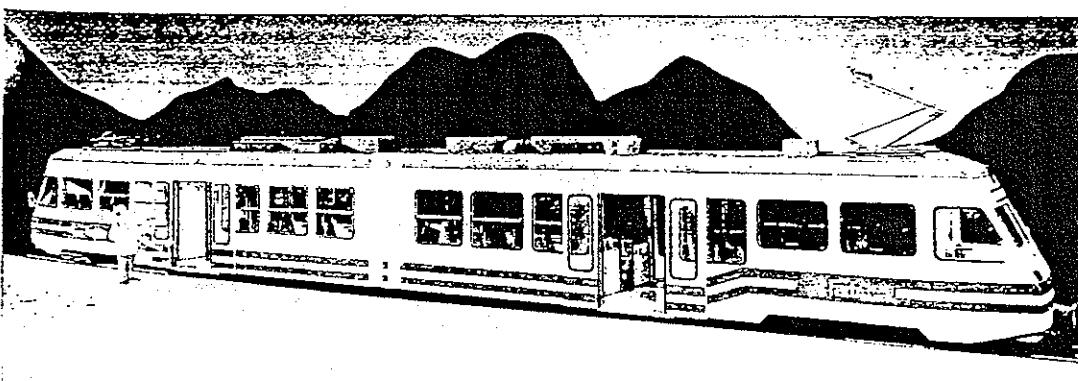
(4) Matériel mis en service le 6 décembre 1991.



encore notablement perfecticonné - pour les matériels de Berne et de Saint-Etienne (4).

De même le matériel GEC Alsthom de Grenoble, littéralement plébiscité par la population, ne paraît pas sur les plans du confort, du bruit et du coût d'entretien, se placer différemment de celui de Nantes dont il dérive assez

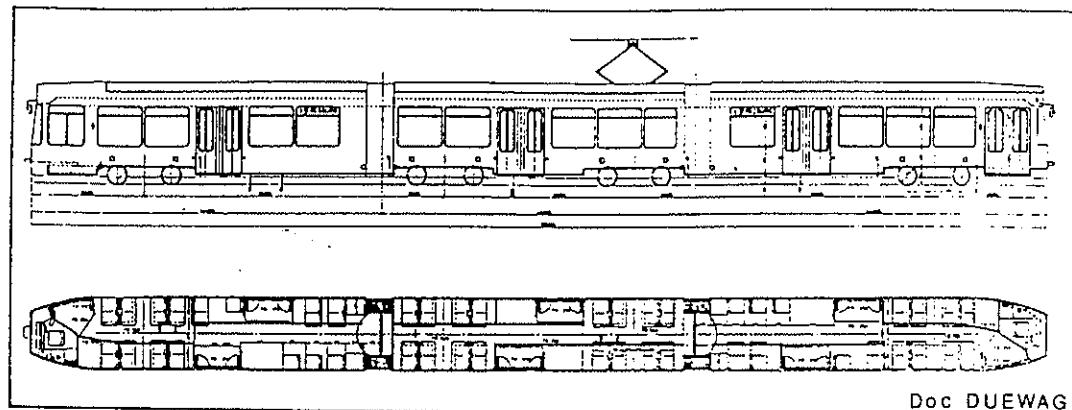
En 1975, à la demande du Ministre des transports Marcel Cavaillé et sous la poussée du GETUM, la DDT avait mis en place un groupe chargé de définir le cahier des charges du tramway français standard. Ce texte fut publié dans "Le Monde", "Corriere della Serra" et "Der Welt". Le verdict de définition fut prononcé en mars 1976. Avaient participé à cette étude 12 personnes dont MM. Bataille (TCL), Bigé (RATP), Cotin, Dobias (INREST), Gibeau (DTT), Guivach (Alsthom), Maître - OCDE et UITP), Vélin (UTP) et les représentants de Francorail MTE et CEM Denik... .



Maquette de l'une des dix automotrices à plate-forme surbaissée AB<sup>e</sup> 4/6 en construction pour le chemin de fer des Centovalli (FART).

Asco Brown Bovis

Matériel Duewag - ABB pour Freiburg im Brisgau.



Doc DUEWAG

étroitement. Tout au plus peut-on lui reprocher son poids élevé qui a naturellement des conséquences sur la consommation d'énergie.

Toutes ces dispositions permettent d'obtenir des matériels avec un plancher à 350 mm s'étendant sur 60% (rame à deux caisses) ou 70% (rame à trois caisses) de la longueur totale avec quatre à six portes par face donnant sur la partie basse.

La formule présente aussi l'avantage d'éviter la remise en cause de l'architecture des bogies moteurs : ceux du tramway de Grenoble sont à détails près, identiques à ceux de Nantes. Vevey utilise des bogies

Duewag classiques mais compactés avec des roues de 560 mm seulement.

Elle nécessite par contre l'envoi de l'équipement électrique en toiture (avec souvent une ou deux armoires en caisse) : ceci ne présente pas d'inconvénient pour un réseau nouveau qui conçoit ses installations en conséquence (exemple de Grenoble) ou pour un réseau qui les reconstruit à l'occasion (Genève) mais ce peut être très gênant pour un réseau ancien où des matériels classiques et surbaissés doivent partager les mêmes dépôts et ateliers. Un inconvénient de ce type de solution a été reproché par divers réseaux notamment allemands : c'est le fait que l'on ne peut installer des portes près du conducteur ou si l'on veut l'installer, elle donne dans la zone à plancher haut et comporte donc trois marches. Sans objet dans les réseaux où toutes les opérations de vente et de perception de tickets se font à terre (Grenoble, Genève) l'inconvénient prend sa valeur lorsque le réseau entend maintenir ces opérations dans les voitures (Kassel, Rostock).

Un autre inconvénient lié à la formule est d'obliger à avoir un escalier de deux ou trois marches raccordant les deux niveaux. La présence de marches à l'intérieur d'un véhicule, qu'il s'agisse d'un tramway ou d'autobus, n'a jamais été vue d'un très bon œil par les exploitants (le cas spécifique des autobus anglais à impériale étant bien évidemment à mettre à part) : ils craignent les chutes de passagers et une répartition moins homogène réduisant de ce fait la capacité réellement offerte. A défaut de supprimer totalement ces inconvénients ce qui est le but recherché avec les matériels à plancher bas intégral, on a cherché à les réduire ; ainsi le compactage du bogie monomoteur Duewag a permis d'abaisser la partie haute habituelle de 850 mm à 710 mm (Berne, Saint-Etienne, Kassel).

Le remplacement du moteur à courant continu placé longitudinalement par deux moteurs asynchrones placés transversalement a permis à DUEWAG d'arriver à un résultat encore plus remarquable pour le matériel actuellement en construction pour la ville de Bochum, puisque la hauteur de la partie haute n'est plus que de 580 mm laissant une seule marche entre ce niveau haut et la partie surbaissée à 350 mm.

Bénéficiant déjà d'une solide expérience montrant manifestement quelle est encore susceptible de perfectionnements et de développements nouveaux, la solution du tramway à plancher bas partiel ne doit pas être trop vite considérée comme déjà dépassée ne serait-ce que parce que tout en offrant l'essentiel des avantages recherchés, elle n'exige pas de prendre des risques sur la faisabilité et le comportement en service des organes essentiels.

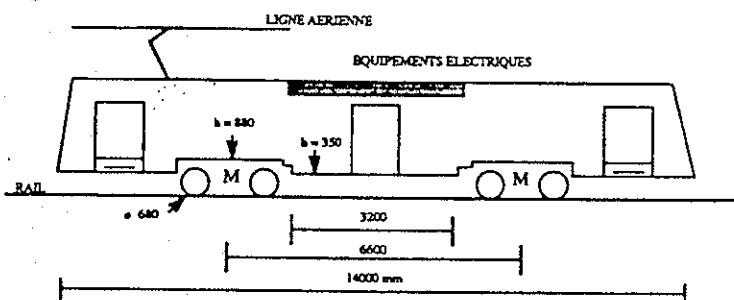
### III - LA REMISE EN CAUSE TOTALE :

#### le tramway à plancher bas intégral :

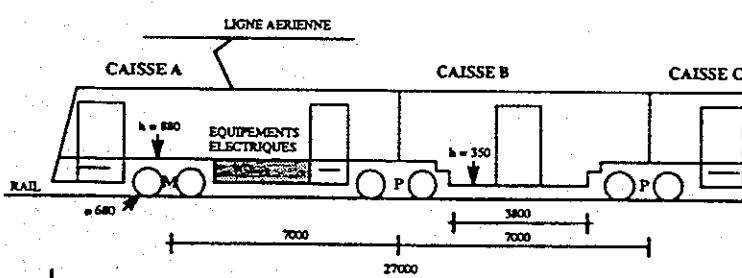
Cette formule, nonobstant des problèmes de réalisation, est évidemment la plus séduisante. Elle permet de retrouver le diagramme intérieur simple des voitures de métro et de tramways classiques sans risque de zone

## TYPES DE MATERIELS EXISTANTS OU PROJETES

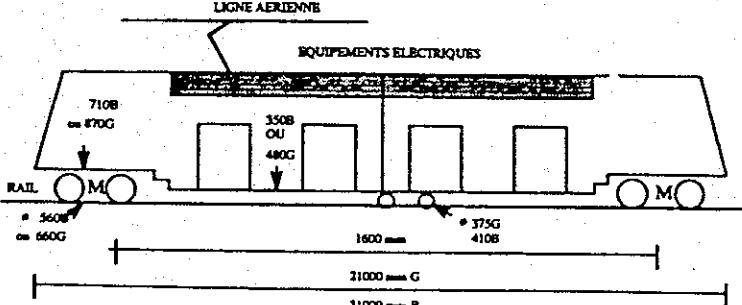
### 1 Prototype SOCDMI ( Italie )

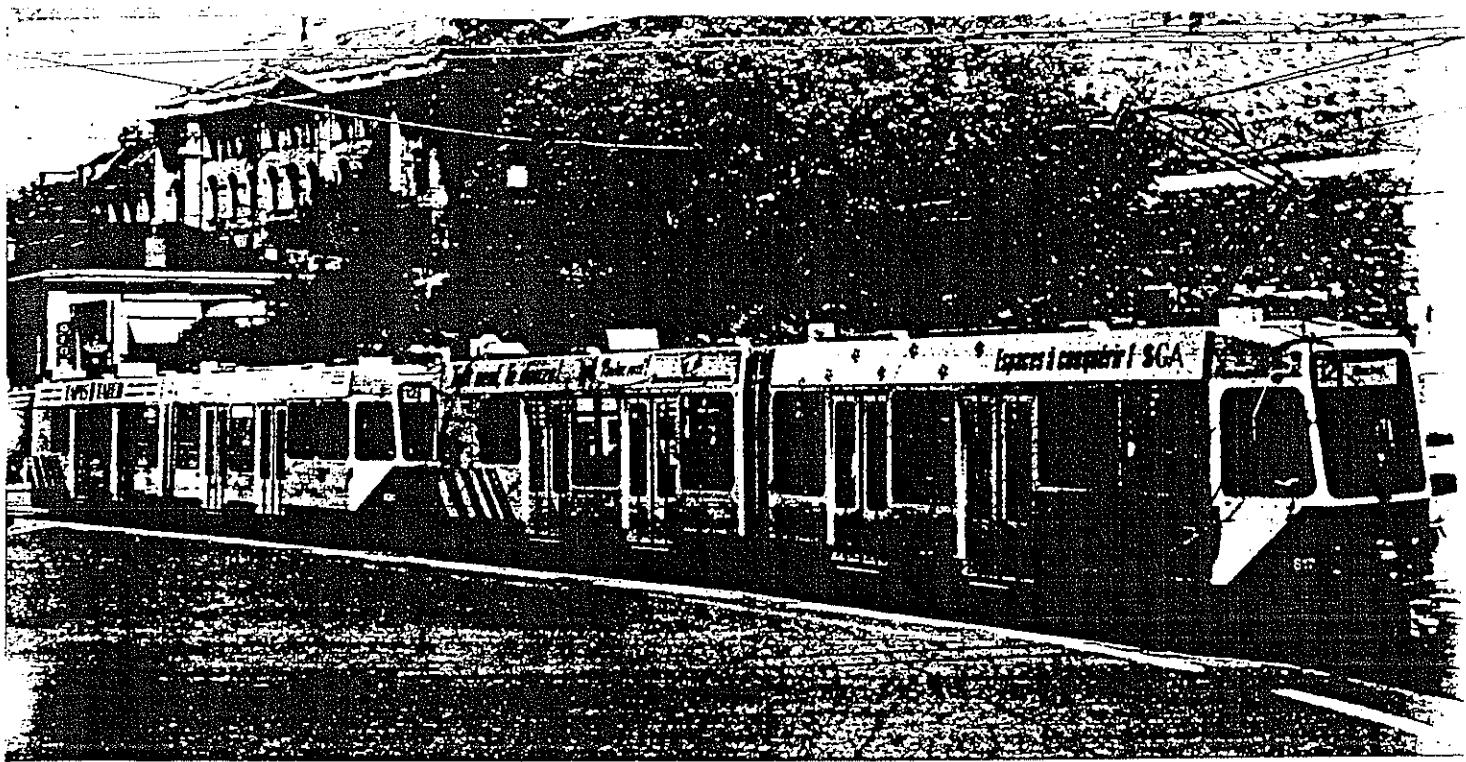


### 2 Réalisation B.N. ( Nouveau tramway de Bâle et Amsterdam )



### 3 Réalisation Vevey ( Nouveau tramway de Genève et Berne )





plus ou moins occupée car plus ou moins en cul de sac ; elle permet également de retrouver un châssis de caisse simple, sans "col de cygne" qu'implique la présence de deux niveaux de plancher différents, elle permet de placer sans difficulté une porte à proximité du conducteur, etc... Ces avantages évidents ne peuvent être toutefois obtenus qu'en tirant un trait sur l'architecture classique du bogie, puisque malgré tous les progrès envisageables en la matière, on ne voit pas comment il serait possible de placer un bogie motorisé sous un plancher dont la hauteur serait limitée à 350 mm.

Face à la demande d'un tel matériel à plancher bas intégral formulée de façons parfois impératives par les collectivités locales, la plupart des constructeurs européens ont cherché des solutions : toutes s'écartant de l'architecture traditionnelle du bogie moteur ; dans la description succincte que nous en ferons, nous avons procédé par ordre d'innovations et donc aussi de risques croissants.

#### a) Solutions conservant le principe du bogie :

Le principe du bogie est conservé mais puisque le couloir du véhicule doit passer au-dessus à une hauteur de 350 mm seulement il faut reporter à l'extérieur des roues le moteur et les réducteurs, les disques de freins et supprimer les essieux. Le constructeur italien SOCIMI a été le premier à se lancer (5), faisant preuve d'un dynamisme peu commun; il a en majorité sur ses fonds propres étudié et construit un prototype de tramway à plancher bas intégral qui a commencé ses essais fin 1989. Il s'agit d'une voiture à caisse unique mais toutes les dispositions retenues seraient reconductibles pour des voitures articulées. Chaque roue est entraînée par un moteur à courant continu de 20 kW tournant à la vitesse maximale très élevée de 6500 tr/min avec un réducteur à deux étages placé comme le disque de frein à l'extérieur des roues. La suspension secondaire est de type pneumatique classique. Chaque moteur est commandé par un hacheur très léger (25 kg) environ développé à partir de sous-ensembles d'origine AEG et MITSUBISHI. Un comparateur vérifie en permanence la vitesse de rotation et d'accélération ou décélération de chaque roue et en déduit des ordres donnés à chaque hacheur pour éviter des glissements et patinages.

Comme il est habituel en Italie tous les sièges du véhicule sont longitudinaux, ce qui permet d'utiliser la place entre le siège et le plancher du véhicule pour loger les coffres d'appareillage électriques ou pneumatiques. Cet extraordinaire prototype visait manifestement le marché de renouvellement des réseaux italiens, et plus particulièrement celui de Milan, où circulent encore des motrices (Peter Witt) datant de 1930. Ces essais semblent aussi

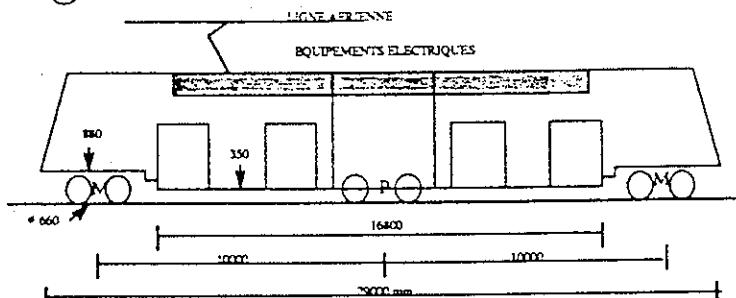
avoir montré que la solution était parfaitement viable, cependant on a pu raisonnablement s'interroger sur l'intérêt de maintenir des moteurs à courant continu tournant à un régime si élevé, alors que l'on dispose à présent de

Genève : rames Be 4/6 mises en service à partir de 1987 par les Transports Publics Genevois.

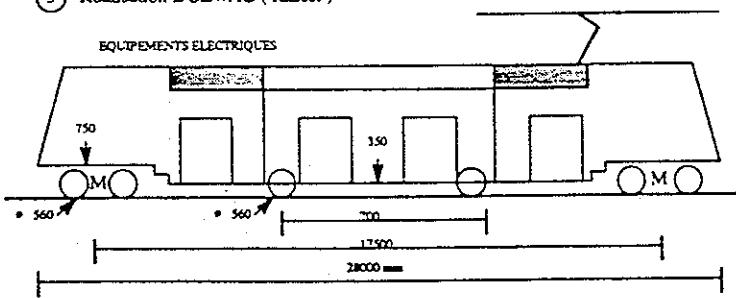
T.P.G

## TYPES DE MATERIELS EXISTANTS OU PROJETES

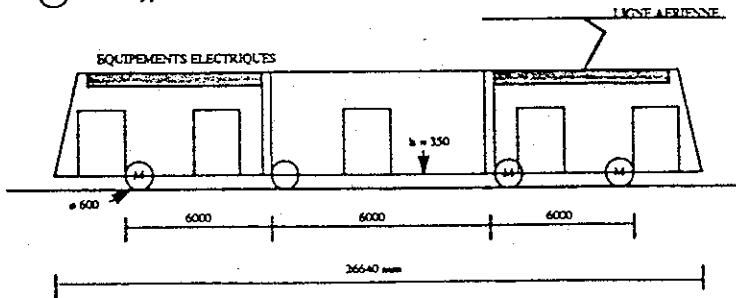
### 4) Réalisation Alsthom ( Grenoble )

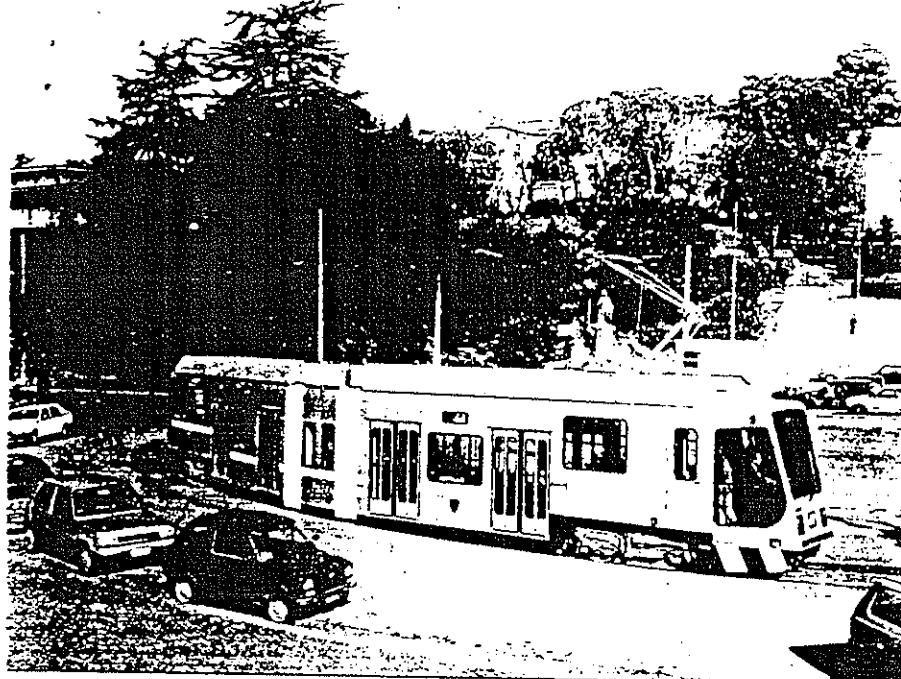


### 5) Réalisation DUEWAG ( Kassel )



### 6) Prototype Stadtbahn 2000, vvv + consortium allemand ( Dusseldorf, Mannheim )





Rame SOCIMI - AEG Westinghouse en essai sur le réseau ATAC de Rome en mars 1991 ; le plan d'encombrement et d'aménagement de ce matériel figure en bas de page.

J. Mahet

moteurs asynchrones beaucoup mieux adaptés à de tels usages. C'est vraisemblablement la raison pour laquelle dans l'offre qu'il a remise pour la fourniture du tramway de Strasbourg, SOCIMI a remplacé cet équipement électrique par un équipement ABB comportant des onduleurs et des moteurs asynchrones refroidis par eau ; disposition a priori compliquée mais offrant de réels avantages (allégement, facilité d'entretien etc...).

Après une mise au point assez laborieuse cela semble à présent donner toutes satisfactions sur la dernière génération du métro de Hambourg. Après avoir exploré diverses solutions GEC Alsthom s'est finalement tourné vers une solution assez voisine de celle de SOCIMI, également avec un moteur asynchrone par roue refroidi par ventilation forcée. C'est ce qu'il a proposé en réponse aux appels d'offres de Strasbourg et aussi de Bruxelles.

Firema a en projet un bogie de conception similaire. Cette famille de solutions (SOCIMI, GEC Alsthom, Firema) ont en commun un certain nombre d'avantages et d'inconvénients.

- 1) Tout d'abord elle ne prend aucun risque important sur les règles fondamentales du roulement et du guidage ferroviaire.
- 2) La motorisation individuelle par roue, évite par principe le glissement roue-rail en courbe (effet de différentiel) ce qui va dans le sens d'un accroissement du confort, d'une réduction du bruit. On peut même espérer que l'usure ondulatoire des rails soit réduite encore qu'ici tant d'espoirs ont été déçus dans le passé qu'il faille être prudent...

3) Il semble qu'il soit possible de motoriser toutes les roues d'une voiture si longue soit elle, ce qui permet de conserver l'intérêt de l'adhérence totale à laquelle beaucoup de réseaux pour des raisons de topographie locale sont particulièrement attachés.

Côté inconvénients, on peut craindre des difficultés techniques de réalisation, par exemple, pour le choix et le montage judicieux des réducteurs et de la suspension primaire. Enfin, la disparition des essieux traditionnels oblige à tenir compte dans le calcul du bogie de la flexibilité des longerons. Ce sont là des difficultés auxquelles sont depuis longtemps habitués les constructeurs de bogies "nord-américains" et qui paraissent bien maîtrisables.

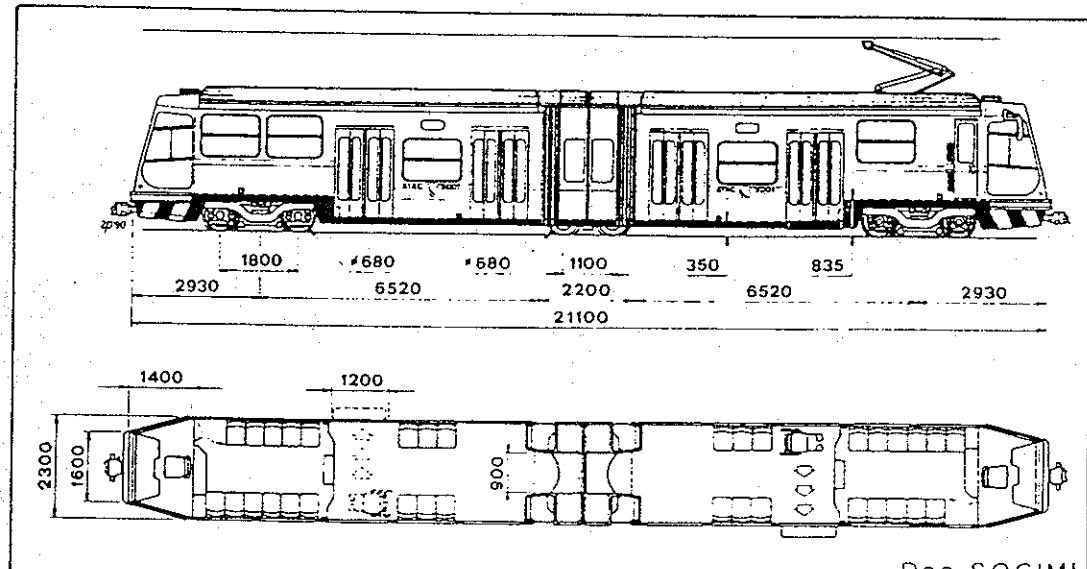
Toute cette sous-famille de solutions techniques que nous venons d'évoquer a eu en commun le fait que les idées de base sont très anciennes (6) ; que plusieurs prototypes les mettant en oeuvre ont été construits. Si le passage au stade de la réalisation industrielle n'a pu être réussi, il n'en demeure pas moins vrai que c'est à cause de la médiocrité des moyens de l'époque, et du niveau technologique insuffisant (résistance des matériaux, précision d'usinage, impossibilité de procéder à des simulations sur ordinateur etc...) que l'on arriva à leur abandon prématûr. A présent ces insuffisances ont disparu et les équipements électriques modernes (moteurs asynchrones, thyristors GTO, etc...) donnent leur pleine chance de succès à des solutions qui paraissent d'une extrême complexité, mais qui en fait procurent des niveaux de fiabilité, auprès desquels les meilleurs équipements classiques paraissent dérisoires. Cela redonne en particulier toutes ses chances aux solutions de motorisation individuelle des roues qui cessaient d'être utopiques pour devenir extrêmement attrayantes.

#### b) Solution ne conservant que partiellement

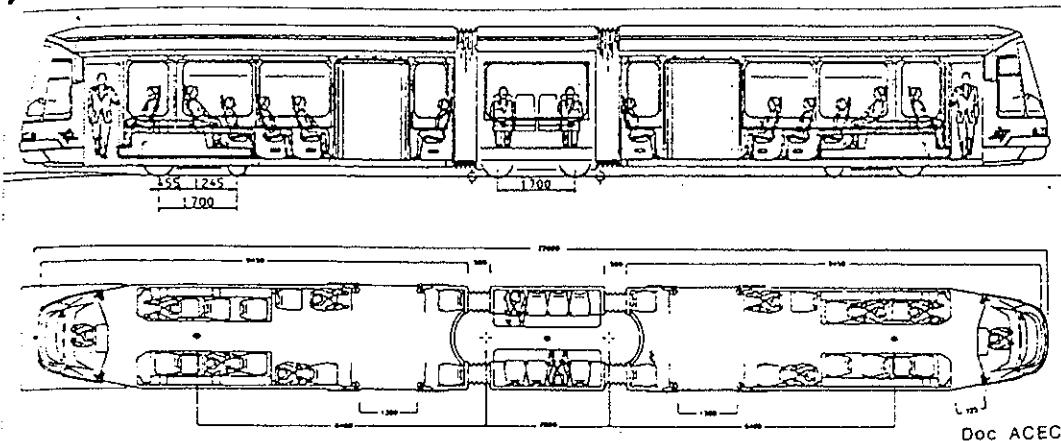
##### le principe du bogie (le bogie changeant de place et d'architecture) :

Dans les années 1960, les réseaux de Brême et de Munich avaient développé, avec les industriels MAN et HANSA, une nouvelle série de voitures avec comme objectif l'allégement et la réduction du niveau de bruit par rapport au matériel articulé classique. Pour ce faire les ingénieurs ont conçu une voiture articulée à deux caisses, reposant sur deux bogies seulement. Pour obtenir la "pliure" de la voiture en courbe il a été imaginé un dispositif assez complexe fournissant un couple de rappel tendant à ramener les bogies et les caisses en position rectiligne. Pour fonctionner convenablement ce dispositif exige que le bogie soit placé beaucoup plus près du centre de chaque caisse, qu'avec les solutions habituelles. De ce fait même dans les courbes les plus serrées, l'angle de rotation

(6) Voir actes et archives des congrès UITP et en particulier les actes des congrès américains des années 1920-1930.



Doc SOCIMI



Le projet ACEC - BN - GEC Alsthom pour Bruxelles et Strasbourg.

du bogie par rapport à la caisse est très réduit, quelques degrés seulement. 179 motrices et 141 remorques ont été construites pour Brême et pour Munich; la mise au point mécanique et en particulier celle du système d'articulations a été extrêmement laborieuse; il a été successivement essayé des systèmes avec ressorts et bielles, contrôlés ou non par des amortisseurs hydrauliques, des systèmes de rappel purement hydraulique par vérins, des systèmes mettant à profit le couple de torsion des coussins pneumatiques de la suspension etc... Il semble que l'on soit arrivé finalement aux résultats visés à l'origine, puisque Brême a continué jusqu'à une date récente (1978), l'acquisition de voitures de ce type ayant bénéficié au fil des années des divers progrès en la matière notamment dans l'équipement électrique.

L'opinion du réseau de Munich paraissait réellement moins favorable, mais comme cette ville avait décidé dès le début des années 1970 d'abandonner progressivement le tramway au profit du métro, le réseau avait cessé dès lors toute acquisition de matériel nouveau. Le tramway "étant condamné" leur opinion n'avait plus en la matière qu'un intérêt relatif. Malgré le côté très hétérodoxe de cette conception par rapport aux règles de l'art, au moins du point de vue du voyageur, le confort de roulement est de très bon niveau même aux vitesses de 60 à 70 km/h couramment pratiquées. Seules surprennent parfois l'amplitude et la mollesse de certains mouvements transversaux lors des entrées et des sorties de courbes probablement très dépendantes de l'état, d'une part de la voie, et d'autre part de celui des organes d'articulation.

Devant l'intérêt croissant suscité par les tramways à plancher surbaissé, la société MAN s'est aperçue qu'elle pouvait faire dériver un matériel au plancher bas intégral à relativement peu de frais pour qu'en accord avec le réseau de Brême, un véhicule soit étudié et fabriqué. Entre temps, la ville de Munich ayant changé sa politique de transport, et décidé de conserver, peut-être d'étendre le réseau de tramways subsistant, a fait passer commande par le réseau exploitant (plutôt de mauvais gré) de deux prototypes similaires à celui de Brême.

Le bogie de la voiture MAN comme il est expliqué ci-dessous, n'a qu'un des battants transversaux par rapport à la caisse très faible. Il suffit donc pour conserver une voiture à plancher plat même au-dessus du bogie de placer le moteur de traction longitudinalement, mais en position fortement décalée par rapport à l'axe de la voiture, et de placer le pont réducteur à l'extérieur de la roue, à un niveau aussi bas que possible.

Le premier essieu du bogie, n'est pas motorisé, et les deux roues sont montées "folles" sur le châssis. Le deuxième essieu du bogie est totalement motorisé puisque un arbre comporte un accouplement élastique qui relie le réducteur principal à la roue placée sur l'autre file de rail.

La voiture de Brême a été livrée fin 1990. Conformément à la pratique courante en Allemagne jusqu'à ces derniers mois, le client a commandé séparément la partie mécanique à son fournisseur habituel, ici Kiepe. Cette firme basée à Dusseldorf est membre du groupe GEC Alsthom. Elle a développé pour cette affaire un équipement mettant à profit les derniers perfectionnements technologiques en matière de thyristors GTO pour le simplifier, l'alléger et en accroître la fiabilité. Munich a procédé de même et a retenu un équipement à moteurs asynchrones Siemens.

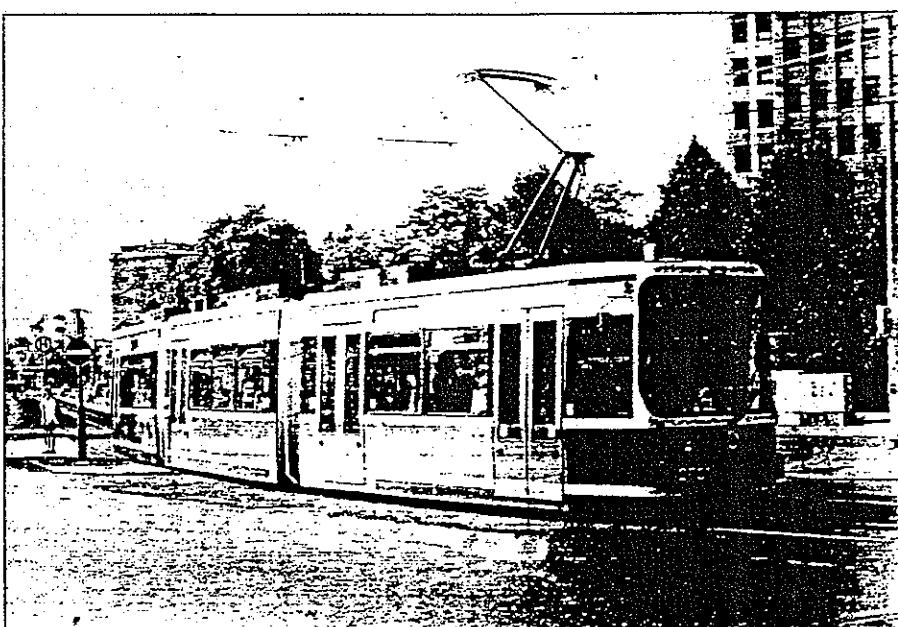
Quel que soit en définitive le type et le fournisseur de l'équipement électrique choisi, la formule MAN a, dès le niveau de la planche à dessin pourrait-on dire, des avantages et des inconvénients assez typés : c'est ainsi que la position longitudinale et très désaxée du moteur de traction auprès de chaque bogie motorisé limite les possibilités de choix en matière de diagramme intérieur, disposition des portes et des sièges etc... au point par exemple, de s'interroger sur l'aptitude d'un tel matériel à être à la fois bidirectionnel et pourvu de l'adhérence totale. A l'inverse, l'expérience acquise à Brême et à Munich permet de ne pas avoir à redouter de fâcheuses surprises dans la plupart des organes mécaniques qui sont repris tels quels dans la version à plancher bas.

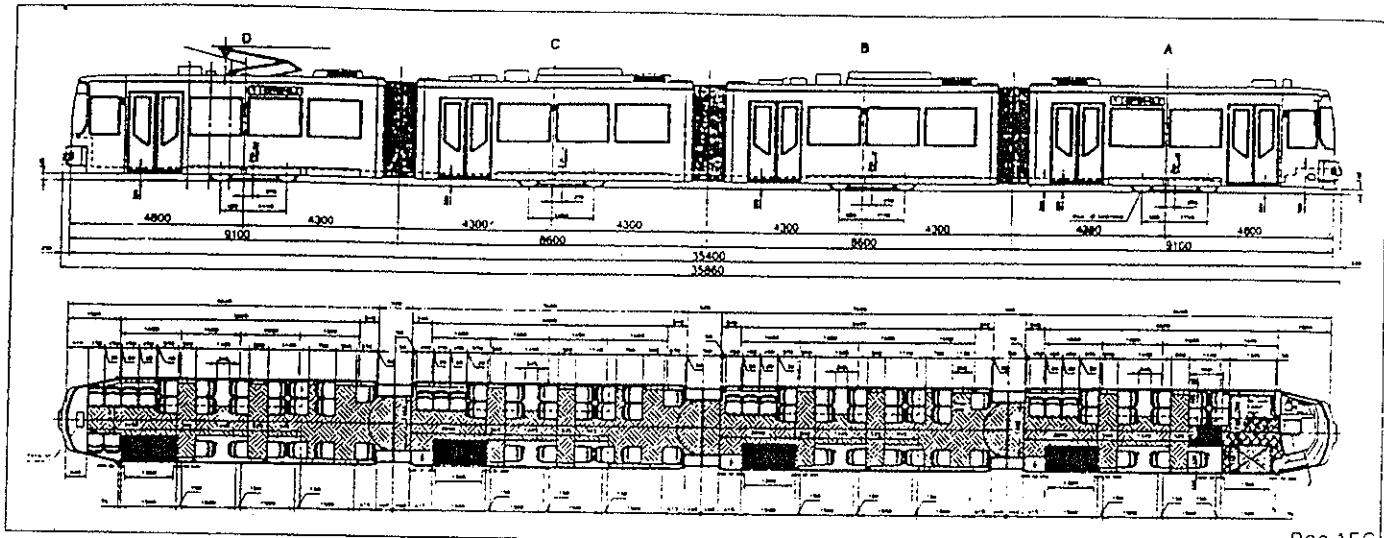
### c) Solutions mettant en oeuvre de nouveaux concepts de bogies ou de trains roulants :

A partir du moment où la recherche du plancher bas intégral amène à "repenser" le bogie, on peut être tenté par des solutions plus radicales encore, en vue de régler le problème des bruits et grincements de boudin en courbe.

Rame prototype à 3 caisses à plancher surbaissé en service sur la ligne 19 de Munich.

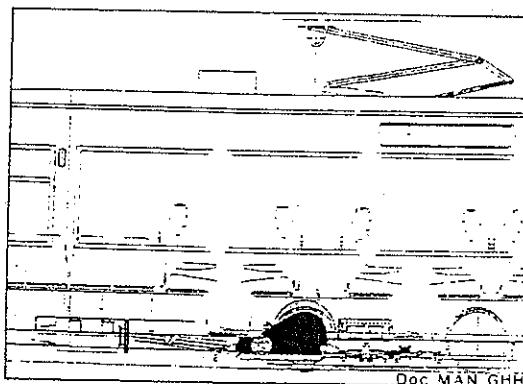
G. Laforgerie





Doc AEG

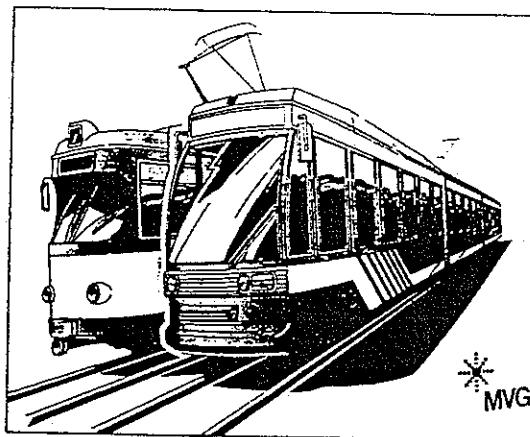
Tramway de Brême Man - Kiepe entièrement surbaissé et schéma de la disposition des sièges au dessus des essieux.



Doc MAN GHF

Extrait d'une affiche des MVG avec le dessin des actuelles et futures rames des tramways de Mannheim.

G. Rannou



Wurzburg : rame à 3 caisses à plancher bas ; les voitures servent de support publicitaire donnant lieu à des décos variées.

G. Rannou

On connaît depuis "belle lurette" le fond du problème. Les deux essieux d'un bogie montés de construction strictement parallèles, le restent évidemment en courbe, ce qui crée ainsi un angle entre la position de la roue et le rail au point de contact : c'est le principe même de guidage ferroviaire par roues à boudin, et c'est aussi la source même des bruits indésirables : ainsi le remède idéal serait de maintenir la roue en position radiale.

On se gardera bien, dans cette note sur les innombrables dispositifs imaginés depuis près d'un siècle pour y parvenir, de les décrire ne serait-ce que brièvement. les auteurs de ces lignes doivent, en ce qui les concerne, témoigner de leur humilité, puisque, bien méfiant, ils avaient cru récemment devoir, dans cette revue "Chemins de Fer" n° 363, signaler l'ingéniosité d'un dispositif conçu à Rotterdam pour maintenir en position radiale le premier essieu des bogies équipant une importante série de motrices unidirectionnelles. La vérité oblige à dire que les résultats ont été en fait désastreux : fissures et rupture d'organes, aggravation des bruits et usures avec en prime quelques dérailllements, ont imposé dans les meilleurs délais l'obligation de revenir à des essieux strictement parallèles.

En fait, hors du domaine du tramway, où la question est compliquée par les courbes de faible rayon et le petit diamètre des roues, on sait "positionner" correctement en position radiale en se servant de l'angle entre caisses consécutives : l'exemple le plus connu est celui du Talgo, et tout laisse à penser qu'il pourrait être conforté par le "BOA" de la RATP. Dans ces deux cas a été fort ingénieusement résolu le problème du positionnement correct du premier et du dernier essieu de la rame. Cela pourrait être également le cas du nouveau matériel BREDA de Lille dans la mesure où ce "faux vrai" matériel à plancher plat intégral a, à chaque extrémité, un bogie "classique".



connant par l'angle "châssis de bogie - châssis de caisse" la référence pour le positionnement correct de l'essieu suivant.

Cette litanie d'échecs dans le domaine particulier du tramway conduit à envisager des solutions plus radicales.

- a) le faux bogie BN - La Brugeoise et Nivelles -
- b) train roulant EEF

*a.1) Solution BN :*

L'industrie belge (BN) avec l'appui du constructeur néerlandais HOLEC ont étudié et construit un prototype de tramway à plancher plat avec des bogies utilisant des trains de roulement qui ressemblent aux anciens bogies à roues inégales (bogie maximum traction) du début du siècle, mais qui sont en fait totalement inédits.

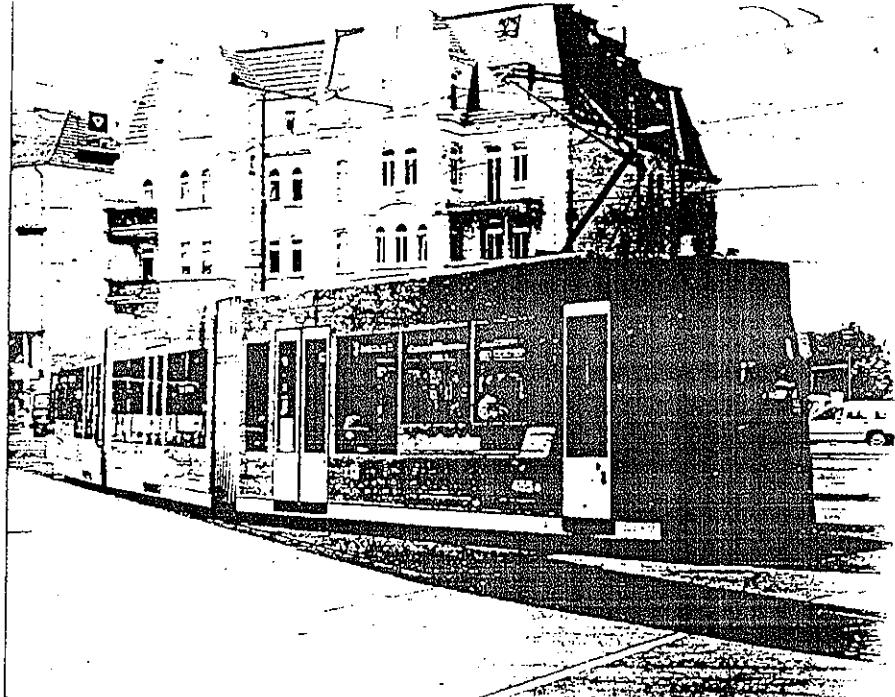
Les Allemands ont un programme également très ambitieux puisqu'un consortium regroupant tous les grands noms de l'industrie ferroviaire, des bureaux d'études spécialisés, et les réseaux de Munich, Düsseldorf, Ludwigshafen et Mannheim lancent un programme de construction de trois prototypes, avec l'espérance d'une série ultérieure de trois à quatre cents voitures destinées à renouveler d'ici une quinzaine d'années la quasi totalité de matériel des réseaux de l'ancienne RFA.

*2) Tramway BN - L.R.V. 2000 :*

L'innovation principale dans ce matériel est donc constitué par l'apparition d'un "bogie articulé" ne comportant pas moins de onze pivots ou rotules par bogie. Il s'agit en fait d'une dérive du bogie qui était prévu, par le système TAU (Transport Automatique Urbain) que l'industrie belge voulait dans les années 80 développer pour concurrencer les métros automatiques et en particulier le VAL. Un avantage supposé du TAU, devait être la possibilité de prendre des courbes jusqu'à 10 m de rayon pour, était-il alors expliqué, suivre le tracé des rues et réduire ainsi le coût du génie civil.

Aucun bogie classique, ne semblant convenir, l'industrie belge a donc développé cet ensemble articulé : quelques années plus tard, quand il est apparu que le marché belge pour un métro automatique guidé paraissait bien mince, et que l'avance prise à l'exportation par le système VAL de Matra, et le système canadien UTDC, enlevait au "TAU" toutes ces chances à l'exportation ; son développement fut stoppé mais les travaux de recherche déjà menés ont été réorientés vers le tramway.

On retrouvera ci-après la maquette de principe de ce bogie dont pratiquement, on ne peut saisir le fonctionnement qu'au vu d'une animation, tant le rôle des diverses articulations paraît complexe. Effectivement, cet ensemble géométrique, dont on pourrait dire qu'il rappelle celui de "deux bicyclettes" placées chacune sur une file de rails, permet bien l'obtention d'un positionnement radial de chaque roue quel que soit le tracé de la voie. Chaque bogie a donc deux roues motorisées, donnant 75% de poids adhérent. En plus de la nouveauté considérable représentée par ce bogie, BN et le constructeur hollandais HOLEC, en ont ajouté une autre. Chaque roue motrice est entraînée par un moteur asynchrone par l'intermédiaire d'un engrenage planétaire.



Kassel : la ligne 3 est entièrement équipée de matériel à 3 caisses à plates-formes à plancher bas à hauteur de quai (ci-contre à l'arrêt de la nouvelle gare Wilhelmshöhe).

G. Laforgerie et G. Rannou

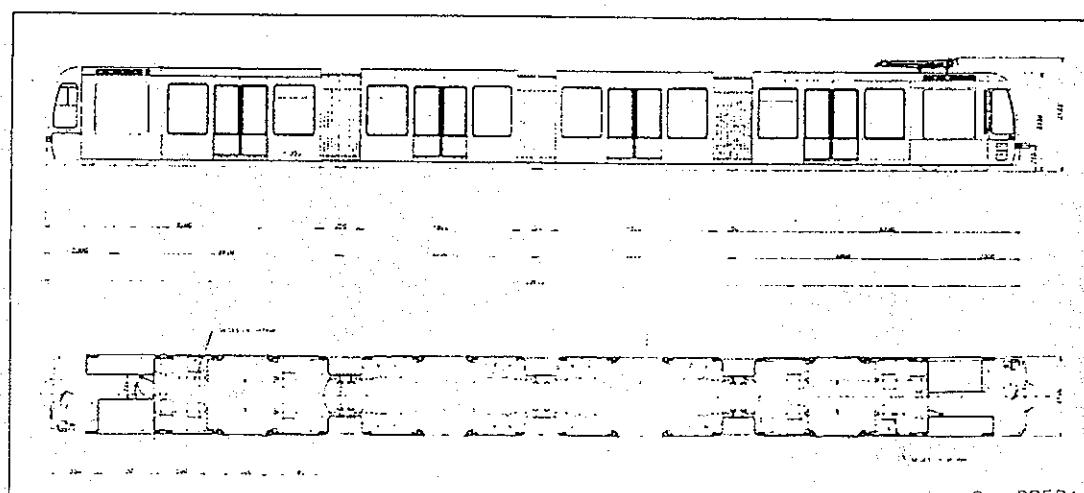
On peut donc dire qu'il s'agit bien, d'un "moteur-roue" à la différence des solutions acceptées par SOCIMI, GEC Alsthom etc... et présentées ci-avant.

Les moteurs asynchrones sont refroidis par eau et l'ensemble de l'équipement électrique est très voisin de celui de tramway livré récemment (1985-1986) par BN et HOLEC au réseau d'Amsterdam. Le prototype LRV 2000 présenté par BN a une caisse d'origine routière puisque pour des raisons d'économie elle est sensiblement identique à celle du véhicule bi-mode GLT actuellement à l'essai à Rochefort (Ardennes belges). La réutilisation de cette caisse imposée de toutes évidences par des considérations immédiates d'économie, complique singulièrement les essais puisque cette voiture ne peut circuler que de nuit sur quelque tronçons du réseau de Bruxelles.

*b) Le train roulant EEF :*

Cette fois la notion de bogies disparaît complètement. Chaque roue est censée se positionner convenablement

Le tramway Breda - AEG Westinghouse pour la ligne Lille-Roubaix-Tourcoing.



Doc BREDABUS



Le tramway Bruxellois et Nivelles "LRV 2000" en essai.  
A.M. Malterre Barthès

en alignement comme en courbe de façon radiale par le seul jeu des phénomènes de conicité entre roue et rail.

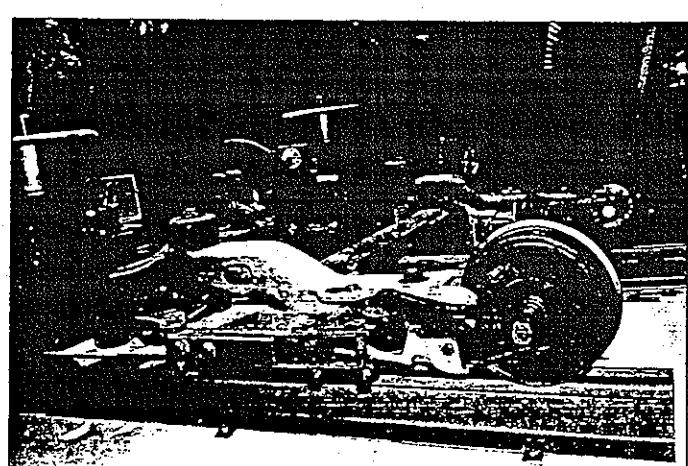
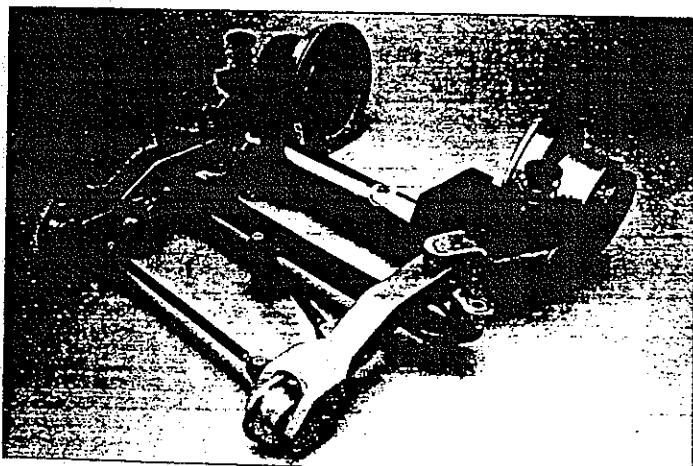
Un esprit malveillant pourrait supposer que l'on est aux limites de l'escroquerie intellectuelle, si l'on ne savait en fait que ce dispositif est le fruit d'un énorme programme de développement ayant mobilisé toutes sources de financement confondues, environ 30 millions de DM (soit à peu près autant en monnaie "inflation déduite" que le coût de développement du tramway PCC en 1935").

Il a nécessité la réalisation et la mise au point de plusieurs modèles mathématiques de calcul, puis celles de maquettes en grandeur naturelle motorisées ou non, et la transformation d'une ancienne motrice de Düsseldorf allant jusqu'au remplacement du bogie par le nouveau système baptisé entre temps EEF (Einzelrad - Einzel - Fahrwerk).

Actuellement trois prototypes sont en construction, deux à voie métrique, un à voie normale, deux avec une caisse en aluminium et un avec une caisse en acier (Mannheim - Düsseldorf - Bonn). Il semble que le retard pris sur le calendrier initial soit déjà très impressionnant. Il est certain que si cette formule répondait réellement aux attentes, on aurait accompli dans ce domaine un progrès au moins aussi important que celui qu'a procuré en son temps le tramway PCC. On aurait brisé cette tendance qui a conduit à voir le poids et le coût du matériel tramway augmenter à un rythme sensiblement double de ce qui est relevé avec les autobus.

Il est évident que le schéma imaginé par le professeur Lambert de l'université technique d'Aix la Chapelle, est lui-même suffisamment habile pour que tous les efforts soient déployés pour tenter de lever tous les doutes qui pourraient subsister à son égard. En cas de succès en effet on pourrait obtenir une réduction de poids du bogie et du véhicule, pouvant atteindre 50% du poids d'une solution classique. On comprend donc bien pourquoi

Le bogie du LRV 2000, maquette de démonstration et vue latérale  
LJN



l'industrie et le Ministère de la Recherche Allemand s'y impliquent si lourdement. Malheureusement cela n'est guère que dans plusieurs années qu'il sera possible d'avoir une expérience suffisante pour le juger.

Actuellement, très sagement, le système EEF en dehors des prototypes, et des essais limités appliqués sur des trains de roues porteurs et non moteurs, est en route, et ce n'est pas par hasard si même les villes qui en sont parties prenantes modernisent leur réseau avec des solutions plus conventionnelles.

Par ailleurs un ingénieux dispositif de bielle maintient constant l'écartement entre roues (1 000 mm ou 1 435 mm) en courbe. Le système est complété par des bielles de reprise d'efforts ayant pour toute influence l'application d'un effort de traction ou de freinage sur une rame quelconque ou sur son orientation. On voit qu'à vrai dire il s'agit de problèmes et de recherches se rapprochant d'avantage de la logique et de la technique automobile que ferroviaire.

Nous avons jusqu'ici traité le sujet sous l'aspect technique et commercial (engouement pour la formule du plancher bas, et problèmes de réalisation). Il faut aussi considérer l'aspect industriel c'est-à-dire prendre en compte la concurrence, ou au contraire les possibilités de coopération qui existent entre groupes nationaux ou multinationaux. Dans ce domaine les choses ont profondément changé dans les dix dernières années. La restructuration de l'industrie ferroviaire est en France pratiquement achevée. Elle est en bonne voie en Allemagne et en Espagne, et elle débute en Italie. Tout ceci pour aboutir à relativement courte échéance à la création de groupes multinationaux qui seront capables chacun de traiter l'ensemble des produits ferroviaires aussi bien en ce qui concerne les organes électriques, que les organes pneumatiques (livraison clé en main); la comparaison avec ce qui s'est passé dans l'industrie aéronautique serait flagrante si l'on ne constatait de la part de la clientèle et notamment des plus grandes entreprises une véritable réticence à acheter du matériel ferroviaire qui ne soit pas intégralement produit par les usines de chaque "pays acheteur".

Malheureusement la mentalité de la "clientèle" notamment collectivités locales, n'a pas évolué dans cette direction : chaque ville (client, district, etc...), souhaitant choisir son propre modèle, de fabrication nationale, à la limite quel qu'en soit le coût. Cela laisse présager pour la création de nouveaux réseaux, où même pour le simple renouvellement de matériel ancien des combats financiers titanesques, où les banques détiendront un rôle fondamental et les cartes maîtresses.

Aussi, sauf en cas d'échec flagrant il est peu vraisemblable que ce soit des considérations techniques, malgré l'importance qu'elles puissent avoir aux yeux des ingénieurs, qui pèsent dans la décision.

Souhaitons que dans le contexte dans lequel celles-ci seront prises, l'intérêt public trouve toujours un moyen de faire entendre sa voix.

