

Traction ferroviaire : les tramways

Caractéristiques des matériels roulants

par **Georges MULLER**

Ingénieur Principal à la Compagnie des Transports Strasbourgeois CTS

1. Tramways à plancher bas intégral : principaux modèles	D 5 551 –	2
1.1 Alstom « Citadis »	–	2
1.2 Alstom Industrie Ferroviaire Cityway	–	4
1.3 AnsaldoBreda « Sirio »	–	6
1.4 Bombardier « Incentro »	–	6
1.5 Bombardier « Flexity Outlook »	–	7
1.6 Bombardier « Eurotram »	–	7
1.7 Bombardier « GTX »	–	7
1.8 Bombardier (VeVeY) – Alstom (SIG) « Cobra »	–	7
1.9 Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles (CAF)	–	7
1.10 Siemens « Combino »	–	9
1.11 Siemens SGP – Elin « ULF »	–	10
1.12 Stadler « Variotram / Variobahn »	–	11
2. Tramways à plancher bas partiel ou à plancher haut	–	12
2.1 Alstom « Citadis »	–	12
2.2 Alstom LHB « NGT8 / MGT8 »	–	12
2.3 Bombardier « Classic »	–	13
2.4 Bombardier « Flexity Swift »	–	14
2.5 Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles (CAF)	–	14
2.6 Leoliner-Fahrzeugbau	–	14
2.7 Siemens « Avanto 70 »	–	16
2.8 Stadler « Tango »	–	16
2.9 Tramways interurbains Stadler	–	16
2.10 Métro-tram « Snelltram »	–	16
2.11 Tramways à impériale	–	18
Pour en savoir plus	Doc. D 5 551	

Le tramway a fait un retour spectaculaire au travers de son histoire mouvementée, notamment dans les villes françaises. Toutes les **composantes du système** tramway qui interviennent dans la conception d'une ligne nouvelle, les principes généraux d'**exploitation** d'un réseau de tramway dans le cadre de la réglementation en vigueur et des impératifs de sécurité ainsi que les principaux critères à prendre compte pour la **conception** du matériel roulant font l'étude du précédent dossier [D 5 550].

Dans le présent dossier [D 5 551], on passe en revue toute la palette des différents matériels proposés par l'industrie ferroviaire européenne. Les matériels les plus répandus font l'objet d'une description plus détaillée. Outre la diversité des technologies mises en œuvre, on constate que, pour des raisons diverses, la solution du véhicule à plancher bas intégral n'est pas forcément adoptée partout. Si certains constructeurs laissent le choix du design des parties frontales à leurs clients, d'autres imposent une standardisation rigoureuse où seules les teintes sont laissées au choix de l'acheteur.

1. Tramways à plancher bas intégral : principaux modèles

1.1 Alstom « Citadis »

Le Citadis est un modèle de tramway qui a été conçu par Alstom pour prendre la relève du tramway français standard (TSF). Il a été construit à 116 exemplaires pour Grenoble (53), à Paris (35) et Rouen (28). Ce matériel, dont la partie surbaissée ne faisait que 70 % de la longueur du véhicule, avait surtout l'inconvénient de ne pas pouvoir être rallongé dans des conditions satisfaisantes avec un taux d'adhérence suffisant. Le Citadis est un tramway modulable en fonction de la capacité recherchée.

1.1.1 Conception générale

Chaque rame se compose de deux modules d'extrémité (ME), avec cabine de conduite intégrée, de nacelles d'intercirculation (NI) et de compartiments voyageurs (CV) qui s'appuient et s'articulent avec deux modules ou nacelles adjacents. Les premiers **Citadis, type 301**, livrés à Orléans (22 exemplaires), Montpellier (30 exemplaires) et Dublin (40 exemplaires), de 1999 à 2002, n'étaient pas à plancher intégral car les études pour un bogie moteur adapté au plancher surbaissé n'étaient pas achevées. Il a fallu installer, sous chaque module d'extrémité, un bogie moteur de conception LHB (groupe Alstom) entraînant, dans la zone concernée, une surélévation de 25 cm du niveau du plancher. Les 30 Citadis 301 de Montpellier et les 26 Citadis 301 de Dublin ont, par la suite, été rallongés d'un compartiment et d'une nacelle supplémentaires, cette dernière reposant sur un bogie moteur de nouvelle génération, ce qui a donné le **Citadis 401**, matériel unique en son genre puisque doté de deux types de bogies moteurs différents.

Entre-temps sont apparus les bogies moteurs de nouvelle génération permettant de construire des tramways à plancher intégral sur bogies Arpège, sauf Melbourne sur bogies Solfège et Rotterdam sur bogies Corège :

- **type 202** : 3 caisses, 2 bogies moteurs, ME-CV-ME, disposition d'essieux : BoBo (figure 1) ;
- **type 302** : 5 caisses, 2 bogies moteurs, 1 bogie porteur, ME-CV-NI-CV-ME, Bo2Bo (figure 2) ;
- **type 402** : 7 caisses, 2 bogies moteurs, 2 bogies porteurs : ME-CV-NI-CV-NI-CV-ME, Bo22Bo ;
- **type 403** : 7 caisses, 3 bogies moteurs, 2 bogies porteurs (Strasbourg) : 2'BoBoBo2'.

La construction de la caisse fait appel à l'acier et à l'aluminium. Le plancher est une construction mixte en aluminium soudé mais les zones au-dessus des bogies sont en acier soudé afin de renforcer la rigidité de l'ensemble. Les parties en acier et en aluminium sont assemblées par boutonnage. Les parois latérales, avec cadres de portes et de baies, sont en aluminium, assemblées séparément, cintrées puis boulonnées sur le plancher. Les différents éléments du pavillon, toujours en aluminium, avec les coffres d'appareillage précâblés, sont posés et fixés à la structure. Après la mise en place des anneaux d'extrémité, la caisse présente un ensemble rigide et résistant. La partie avant était conçue, à l'origine pour résister à un effort à la compression de 200 kN, valeur qui a été portée à 400 kN à partir des livraisons pour Grenoble, Paris T3 et Strasbourg. Les modules et compartiments passent alors à la chaîne de montage ; ils sont assemblés et montés sur les bogies et reçoivent les différents composants du pupitre de conduite déjà câblés, les habillages en polyester intérieurs et extérieurs, y compris en toiture, les revêtements de sol et les sièges.

Glossaire

A'	bogie moteur à 1 essieu dont les roues s'orientent en courbe en fonction du rayon
B	bogie monomoteur à 2 essieux, ne pouvant pivoter sous la caisse
B'	bogie monomoteur à 2 essieux, pouvant pivoter sous la caisse
Bo	bogie bimoteur à 2 essieux, ne pouvant pivoter sous la caisse
Bo'	bogie bimoteur à 2 essieux, pouvant pivoter sous la caisse
1'	bogie porteur à 1 essieu dont les roues s'orientent en courbe en fonction du rayon
2	bogie porteur à 2 essieux, ne pouvant pivoter sous la caisse
2'	bogie porteur à 2 essieux, pouvant pivoter sous la caisse



Figure 1 – Tramway type 202, construit pour Melbourne, plus court de la gamme Citadis (photo GM)



Figure 2 – Tramway type 302, modèle le plus répandu, ici dans sa version pour Barcelone (photo GM)

La rame, assemblée et équipée, est alors amenée dans un hall spécial où sont effectués tous les essais électriques statiques sous 750 V ; à la fin de ceux-ci, la rame est dirigée sur la voie d'essais

où ont lieu les essais dynamiques, de type pour la première rame, de série pour les suivantes, avant l'expédition vers la destination finale.

1.1.2 Bogies

■ Pour les Citadis à plancher bas intégral, Alstom a développé le **bogie porteur Arpège**. Le châssis du bogie porteur se compose de deux ensembles longeron - faux essieu surbaissés en L, articulés entre eux par des éléments élastiques, formant un cadre déformable pour tenir compte des gauches de la voie. À l'extérieur de ces longerons sont fixées quatre roues élastiques de 530 mm de diamètre à l'état neuf sur lesquelles sont également fixés les freins à disque à commande électro-hydraulique. Une caractéristique de ce bogie est l'absence de suspension primaire, le constructeur ayant fait le choix de roues « superélastiques » comportant deux anneaux concentriques en caoutchouc insérés entre le corps de la roue et le bandage. La suspension secondaire est assurée par quatre ressorts hélicoïdaux sur lesquels repose l'élément de caisse. Chaque longeron du châssis de bogie supporte un patin électromagnétique pour le freinage d'urgence. Des amortisseurs hydrauliques, un transversal et deux verticaux, assurent un roulement stable sans mouvement de lacet, la fonction anti-roulis étant assurée par une barre de torsion.

■ Le **bogie moteur Arpège** (figure 3) comporte la même mécanique. À l'extérieur de chaque angle fixe du cadre de bogie, donc en diagonale, est monté, transversalement, un moteur de traction triphasé asynchrone de 120 kW qui entraîne, par une chaîne cinématique passant par le faux essieu, les deux roues qui se font face. Deux blocs de frein à disque sont flasqués sur les roues opposées à la position du moteur de traction. Le bogie, fixé au châssis de la caisse, peut, en entrée de courbe, subir une légère rotation de 2°, par rapport à l'axe longitudinal, rotation limitée par des silentblocs en caoutchouc.

■ Pour les Yarra Trams de Melbourne, exploités par le groupe français Transdev, réseau tentaculaire de 42 lignes, dont l'état des voies va de l'excellent au médiocre, Alstom a livré, en 2001, 31 rames 202 dotées de **bogies Solfège** (figure 4) s'accommodant mieux des irrégularités de voies fatiguées. Ce bogie, possède également deux faux essieux surbaissés mais les deux moteurs de traction sont fixés latéralement en position horizontale et entraîne, au moyen de deux réducteurs à engrenages et d'un pignon conique, les deux roues indépendantes d'une même file de rails. Une suspension primaire a été prévue, le cadre du bogie reposant sur la carcasse de chaque réducteur au moyen de ressorts métal-caoutchouc. Des amortisseurs assurent la stabilité de marche.

■ Les 60 rames 302 construites à La Rochelle pour la RET de Rotterdam appartiennent à la famille Citadis mais s'en différencient sur deux points. Les parois latérales ne sont pas galbées mais planes comme sur les 202 construits pour Melbourne. Le lit de caisse est entièrement en acier. Les bogies sont d'un autre modèle développé par Alstom, le type **Corège** (figure 5).

Dans ce bogie, les deux moteurs de traction asynchrones sont suspendus élastiquement au châssis du bogie dans le sens longitudinal mais il n'y a pas de faux essieu coulé entre les roues indépendantes. Chaque moteur entraîne deux roues d'une même file de rails au moyen d'un réducteur et d'engrenages coniques. Le châssis principal du bogie repose, au moyen de ressorts métal-caoutchouc, sur deux sous-cadres auxquels sont fixées deux roues indépendantes se faisant face. Chaque sous-cadre peut ainsi, grâce à la suspension primaire élastique, légèrement s'orienter par rapport au cadre de bogie principal, ce qui procure une entrée en courbe particulièrement douce, et des amortisseurs garantissent une bonne stabilité du bogie en ligne droite. La suspension secondaire est assurée par deux paires de ressorts hélicoïdaux, fixés sur la partie supérieure du châssis de bogie, ainsi que par deux amortisseurs.

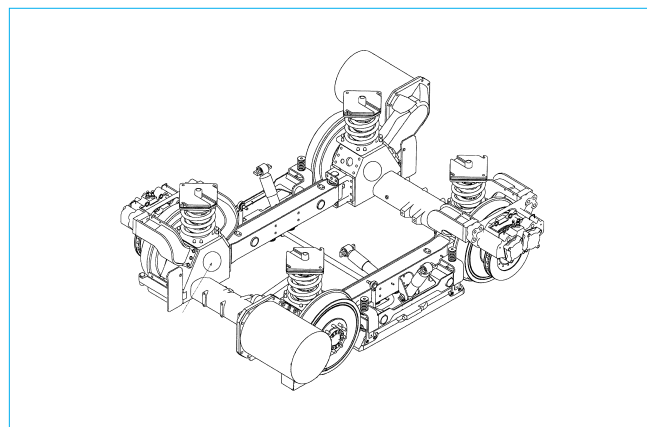


Figure 3 – Bogie moteur Arpège pour les Citadis standards (Alstom)

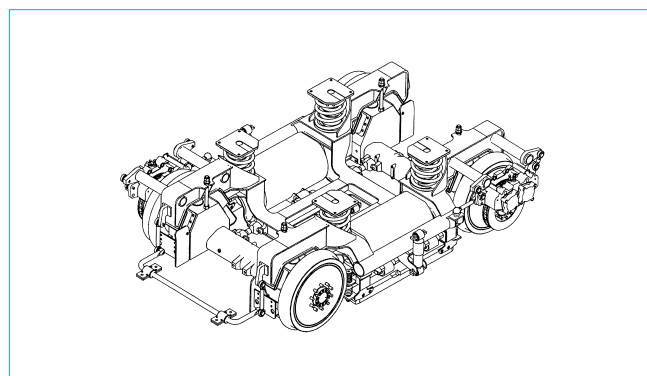


Figure 4 – Bogie moteur Solfège pour Melbourne (Alstom)

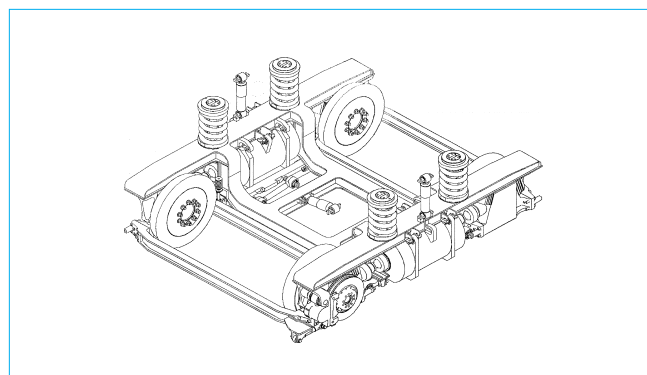


Figure 5 – Bogie moteur Corège pour Rotterdam (Alstom)

1.1.3 Traction

L'équipement de traction comprend le pantographe, le parafoudre, le disjoncteur ultrarapide, un coffre onduleur Onix 800 pour chaque bogie moteur (2 pour les 202 et 302, 3 pour les 402 et 403) ainsi que 4 ou 6 moteurs de traction. Chaque coffre Onix 800 comprend, outre les filtres HF (limitation des courants HF produits par les équipements de puissance) et BF (limitation des

harmoniques et lissage du courant de ligne), un onduleur à IGBT alimentant les deux moteurs asynchrones d'un même bogie, un hacheur de freinage à IGBT et un rhéostat de freinage. Les moteurs de traction sont refroidis par eau, technique déjà appliquée, avec succès, sur les 26 premiers Eurotrams de Strasbourg en 1994.

Un convertisseur statique, alimenté par la tension de ligne, délivre du courant triphasé 400 V pour les blocs de climatisation, et du 24 V – pour la signalisation lumineuse, l'éclairage, la phonie, etc.

Les fonctions de contrôle et de commande, d'aide à la conduite, de gestion des défauts, du système d'aide à l'exploitation, etc. sont gérées par une unité centrale à microprocesseur du système informatique embarqué Agate. Par prudence, les fonctions de la boucle de sécurité et du frein de secours sont assurées par une logique câblée.

1.1.4 Le Citadis 403

L'évolution la plus récente dans la gamme Citadis est le modèle 403 livré en 2006-2007 à 41 unités pour la Compagnie des transports strasbourgeois CTS (figure 6). La CTS, en effet, exploite, depuis 1994, une flotte de 53 Eurotrams pourvus de 6 à 8 portes doubles sur toute la longueur des rames et il ne pouvait pas en être différemment pour les matériels futurs, car, sur les lignes à fort trafic, les portes simples sont source de conflits et rallongent le temps d'arrêt. Alstom a cherché une solution pour rendre le type 402 conforme aux spécifications de la CTS.

La possibilité de remplacer les portes simples par des portes doubles dans les modules d'extrémité exigeait de rallonger ceux-ci de 20 % par rapport au modèle standard. Comme le porte-à-faux aurait interdit tout croisement en courbe, il a été décidé de remplacer les bogies Arpège d'extrémité par des bogies porteurs type Magdebourg développés par Alstom LHB pour les tramways de ce réseau (figure 7). Ce bogie, disposé sous la cabine de conduite peut pivoter sous la caisse porteuse et l'inscription en courbe est excellente. Dans le catalogue des Citadis d'Alstom, le véhicule de Strasbourg est dénommé 403 et est le plus grand dans sa catégorie. Grâce à ses huit doubles portes par face, qui permettent des temps d'arrêt courts en station, donc un gain de productivité pour l'exploitant, le modèle 403 devrait devenir le tramway par excellence pour les lignes à fort trafic des grandes agglomérations.

Les caractéristiques générales du Citadis font l'objet du tableau 1.

1.2 Alstom Industrie Ferroviaire « Cityway »

Après le rachat, par Alstom, de la branche ferroviaire de FIAT, il y a eu rapprochement entre les usines du groupe. Sur la base des tramways construits pour Rome dans l'usine de Savigliano, près de Turin, Alstom développe, pour le marché des grandes villes italiennes, le modèle « Cityway » (figure 8). C'est, à nouveau, un véhicule modulable en longueur suivant le principe du Citadis.

La caisse est en aluminium soudé et a une résistance frontale à la compression de 500 kN. Si la motorisation de la version pour Rome est assez classique, celle pour Turin et Messine fait appel à des moteurs synchrones à aimants permanents réalisés par Parizzi. Les roues sont montées sur un faux essieu surbaissé. Celles qui sont motorisées sont entraînées par un moteur de 40 kW fixé transversalement au châssis du bogie et à côté de la roue à



Figure 6 – Strasbourg : lignes harmonieuses d'un Citadis 403 avec portes doubles généralisées (photo GM)



Figure 7 – Strasbourg : bogie porteur d'extrémité « Magdebourg » construit par Alstom LHB (photo H. Hondius)

entraîner. La transmission des efforts de traction et de freinage se fait par l'intermédiaire d'un réducteur, solidaire de la suspension primaire, et d'un court arbre creux qui entraîne la roue motrice par accouplement élastique. La suspension secondaire, entre le bogie et la caisse, est pneumatique avec correction automatique du niveau du plancher. Des amortisseurs longitudinaux et transversaux, assurent la stabilité de marche du bogie.

À noter que, en raison du profil en long à peu près horizontal des lignes à Turin et à Messine, les bogies extrêmes sont à adhérence partielle, deux roues seulement sur quatre étant motorisées, les autres roues recevant les freins à disque à commande électrohydraulique. Chaque bogie est pourvu de deux patins électromagnétiques pour le freinage d'urgence.

Les caractéristiques générales du Cityway sont données dans le tableau 2.

Tableau 1 – Caractéristiques générales du matériel Alstom Citadis

Réseau	Type	Voie (mm)	Nombre	Années	Longueur (m)	Largeur (m)	Places ass/tot	Puissance (kW)
Lyon I	302	1 435	47	2000-2004	32,42	2,40	56/201	4x120
La Rochelle	302	1 435	1	2001	32,50	2,40	56/201	4x120
RATP I	302	1 435	26	2002	32,70	2,40	48/213	4x120
Melbourne	202	1 435	36 (1)	2001-2002	22,90	2,65	40/145	4x120
Rotterdam	302	1 435	60 (2)	2002-2004	31,20	2,40	63/168	4x100
Barcelone	302	1 435	37	2002-2005	32,52	2,65	64/218	4x120
Bordeaux I	302	1 435	12	2002-2003	32,85	2,40	48/218	4x120
Bordeaux I	402	1 435	58	2002-2004	43,99	2,40	70/300	6x120
Grenoble	402	1 435	35	2005-2006	43,70	2,40	82/271	6x120
RATP II	402	1 435	21	2006	40,00	2,65	82/302	6x120
Strasbourg	403	1 435	41	2005-2007	45,06	2,40	64/288	6x120
Mulhouse	302	1 435	27	2005-2006	32,50	2,65	64/231	4x120
Valenciennes	302	1 435	21	2005-2006	32,90	2,40	48/184	4x120
Teneriffe	302	1 435	20	2005-2006	32,16	2,40	50/140	6x120
Montpellier II	302	1 435	27	2005-2006	32,52	2,65	64/210	4x120
Bordeaux II	302	1 435	6	2006	32,85	2,40	48/218	4x120
Bordeaux II	402	1 435	24	2006-2007	43,99	2,40	70/300	6x120
Nice	302	1 435	20	2006-2007	33,02	2,65	54/216	4x120
Tunis	302	1 435	30	2006-2007	31,58	2,40	58/196	4x120
Madrid	302	1 435	70	2006-2007	32,52	2,40	54/203	4x120
Lyon (Léa)	302	1 435	10	2006	32,42	2,40	56/201	4x120
Bordeaux	302	1 435	4	2007	32,85	2,40	56/203	4x120
Le Mans	302	1 435	23	2007	32,16	2,40	48/211	4x120
Jerusalem	302	1 435	46	2007-2008	32,52	2,65	64/228	6x120
Toulouse	302	1 435	18	2008-2009	32,16	2,40	48/211	4x120
Alger	402	1 435	34	2009-2010	43,81	2,65	78/302	6x120
Angers	302	1 435	17	2008-2009	32,42	2,40	56/147	4x120
Reims	302	1 435	18	2009-2010	32,42	2,40	56/205	4x120
Orléans	302	1 435	21	2009	32,42	2,40	48/204	4x120
Dublin	402	1 435	18	2008-2009	40,00	2,40	78/270	6x120

(1) avec bogie Solfège
(2) avec bogies Corège



Figure 8 – Présentation d'une rame « Cityway » d'Alstom Ferroviaria au réseau de Turin (photo GM)

1.3 AnsaldoBreda « Sirio »

Ce constructeur, situé en Toscane, résulte du mariage entre l'électricien Ansaldo de Gênes et du grand constructeur de locomotives et de tramways Ernesto Breda. AnsaldoBreda a mis au point une gamme de tramways modulaires dont la longueur varie

de 20 m à 35 m. Les différents modules peuvent, eux-mêmes, être réalisés dans des longueurs différentes en fonction des spécifications du cahier des charges, par exemple en ce qui concerne le nombre et la largeur des portes. Signe distinctif de la marque, la face avant est, normalement, standard, en forme de miroir ovale mais le réseau suédois de Göteborg a négocié une face avant totalement différente ainsi qu'une porte double dans le module avant. La motorisation est, naturellement, asynchrone.

Les caractéristiques générales du Sirio sont données dans le tableau 3.

1.4 Bombardier « Incentro »

L'Incentro est un tramway de construction modulaire qui, pour ADtranz qui l'a conçu en son temps, devait prendre la suite de l'Eurotram, jugé trop cher pour la majorité des réseaux potentiellement intéressés. D'un très bon confort, ce matériel n'a connu qu'un succès limité par rapport au modèle « Flexity Outlook ». Construit à Berlin, il intéresse la capitale allemande dont les spécialistes ont été enchantés par les essais, chez eux, d'une rame prêtée par le réseau de Nantes.

Les caractéristiques générales de l'Incentro sont données dans le tableau 4.

Tableau 2 – Caractéristiques générales du matériel Alstom Ferroviaria « Cityway »

Réseau	Essieux	Voie (mm)	Nombre	Années	Longueur (m)	Largeur (m)	Places ass/tot	Puissance (kW)
Rome	2BoBo2	1 445	45	1999-2000	33,00	2,40	54/180	4x150
Rome	2BoBoBo2	1 445	2	2001	41,40	2,40	66/240	6x150
Turin	(1A)BoBo(A1)	1 445	60	2000-2003	34,00	2,40	38/195	12x40
Messine	(1A)Bo(A1)	1 435	15	2002-2003	22,50	2,40	24/180	8x40

Tableau 3 – Caractéristiques générales du matériel AnsaldoBreda « Sirio »

Réseau	Type	Essieux	Voie (mm)	Nombre + option	Livraison	Longueur (m)	Largeur (m)	Puissance (kW)
Milan	7C4	Bo22Bo	1 445	58	2001-2004	35,35	2,40	4x106
Milan	5C3	Bo2Bo	1 445	35	2004-2005	25,00	2,40	4x106
Naples	3C2	Bo2Bo	1 435	22	2004	19,80	2,30	2x106
Göteborg	5C3	Bo2Bo	1 435	40 + 60	2005	29,35	2,65	4x106
Athènes (cf. figure 9)	5C3	Bo22Bo	1 435	35	2004	32,00	2,65	4x106
Sassari	5C3	Bo2Bo	1 000	4	2005	27,10	2,40	4x106
Florence	5C3	Bo2Bo	1 435	17	2007	31,90	2,40	4x106
Bergamo	5C3	Bo2Bo	1 435	14	2006-2007	29,80	2,40	4x106

Tableau 4 – Caractéristiques générales du matériel Bombardier « Incentro »

Réseau	Type	Voie (mm)	Nombre + options	Livraison	Longueur (m)	Largeur (m)	Puissance (kW)
Nantes	AT5/6L	1 435	33	2000-2001	36,40	2,40	8x45
Nottingham	AT5/6	1 435	15	2003-2004	33,00	2,40	8x45
Berlin	AT5/6	1 435	4 + 206	2008-...	33,00	2,40	8x45



Figure 9 – Modèle « Sirio » retenu pour équiper le tramway d'Athènes (photo T. Meyer-Eppler)

1.5 Bombardier « Flexity Outlook »

À l'origine dénommé « Cityrunner », le « Flexity Outlook » est devenu l'un des chevaux de bataille de Bombardier. La construction de la caisse est en acier à l'exception du pavillon qui est en aluminium collé sur la structure en acier. La structure des modules d'extrémité, des passages d'articulation ainsi que les parois latérales sont en acier inoxydable. Les habillages extérieurs et les cadres de baie sont en aluminium et, peints au préalable, sont collés.

Les bogies se différencient des autres modèles par le fait que, de manière tout à fait classique, les roues, de 560 mm de diamètre (Bruxelles : 580 mm) sont calées sur des essieux, de la manière la plus classique. Les bogies, par contre, n'ont qu'un débattement limité à $\pm 2''$ par des silentblochs. La suspension primaire est assurée par des ressorts métal-caoutchouc, la suspension secondaire par des ressorts hélicoïdaux. Les versions les plus courantes à cinq modules sont dotées de deux bogies moteurs et d'un bogie porteur disposé au milieu de la rame ; les versions longues à sept modules (Linz, Genève, Bruxelles) possèdent un troisième bogie moteur. La stabilité de marche en alignement, même à 70 km/h, est de grande qualité.

Chaque bogie moteur est équipé de deux moteurs asynchrones Elin de 105 kW, refroidis par air, et de deux patins électromagnétiques d'une force d'attraction unitaire de 90 kN.

Les seuils de porte sont à la cote de 320 mm (sauf Bruxelles à 350 mm), le plancher, dans le couloir central à 370 mm, et s'élève à 450 mm (sauf Bruxelles à 480 mm) au-dessus des bogies avec une pente de 6° pour raccorder les 2 niveaux, ce qui est pratiquement imperceptible pour les voyageurs.

Les caractéristiques générales du Flexity Outlook sont données dans le tableau 5.

1.6 Bombardier « Eurotram »

L'Eurotram de Strasbourg, à son apparition en 1994, a rompu avec toutes les réalisations antérieures, tant pour son design futuriste que par ses innovations techniques. L'évolution la plus récente de ce matériel est la version réalisée pour Porto qui reprend les bogies de Strasbourg mais est au gabarit de 2,65 m pour offrir une capacité supérieure à une vitesse maximale de 70 km/h et est couplable en unités multiples grâce à un attelage automatique intégral.

Les caractéristiques générales de l'Eurotram font l'objet du tableau 6.

1.7 Bombardier « GTX »

C'est le premier modèle de tramway à plancher bas intégral, construit au début des années 1990 dans l'usine MAN de Nuremberg, avec un équipement AEG, avant que ces deux constructeurs ne soient rachetés par ABB, avant d'être absorbés par ADtranz devenu Bombardier 10 ans plus tard... La notion de plancher bas intégral était relative puisque chaque moteur de traction était logé à l'intérieur de la caisse et transmettait son couple, par un arbre à cardan, à une boîte de transfert qui transmettait le couple moteur à deux roues parallèles. La production a cessé en 2001.

Les caractéristiques générales du GTX sont données dans le tableau 7.

1.8 Bombardier (VeVeY) – Alstom (SIG) « Cobra »

Le Cobra est un modèle de tramway original développé conjointement par le réseau de Zurich et par le constructeur ferroviaire Schindler de Pratteln, près de Bâle. C'est une extrapolation du prototype 401 construit pour Berne en 1966. Le principe du train de roulement consiste à remplacer les bogies par un truck reposant sur quatre roues indépendantes et orientables dans les courbes. L'empattement entre les roues est de 3,25 m. Deux moteurs de traction sont disposés en long et suspendus à la caisse. Chaque moteur triphasé asynchrone entraîne deux roues d'une même file de rails à l'aide d'un arbre à cardan télescopique et d'un réducteur. Sur la caisse motrice centrale, chaque moteur n'entraîne qu'une roue.

Lorsque le véhicule entre en courbe, la première caisse s'inscrit progressivement dans le rayon et l'angle qu'elle forme avec la seconde caisse se transmet mécaniquement aux roues qui, à leur tour s'inscrivent dans le rayon. Les frottements observés sont faibles et la progression de la rame en courbe est assez silencieuse.

Le Cobra (figure 12) est un tramway unidirectionnel composé de trois caisses motrices alternant avec deux modules plus courts, suspendus aux caisses motrices et dévolues, principalement, à la montée et à la descente des voyageurs. La construction de la caisse était prévue, à l'origine, en fibres de verre mais c'est finalement une construction en aluminium boulonné qui a été retenue. Seuls les bouts avant et arrière sont en fibres de verre. Le plancher est à la cote de 370 mm mais s'abaisse à 320 mm aux seuils de portes.

Les caractéristiques générales du Cobra sont données dans le tableau 8.

1.9 Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles (CAF)

Le grand constructeur ferroviaire du Pays Basque espagnol (Beasin), spécialiste historique des tramways et des rames électriques pour services de banlieue ou régionaux, devant la renaissance du tramway en Espagne et après avoir construit les nouveaux tramways pour Bilbao (Euskotran), offre à présent un modèle de tramway à plancher bas intégral qui est actuellement en cours de livraison ou en construction pour trois nouveaux réseaux de tramways. Il fournit également des tramways pour le marché américain, des États-Unis à l'Argentine.



Figure 10 – Genève : rames Bombardier « Flexity Outlook »
(photo JP Coppex)



Figure 11 – Eurotram de Porto

Tableau 5 – Caractéristiques générales du matériel Bombardier « Flexity Outlook »

Réseau	Essieux	Voie (mm)	Nombre	Livraison	Longueur (m)	Largeur (m)	Puissance (kW)
Graz	Bo2Bo	1 435	18	2000-2001	27,00	2,20	4x100
Linz	Bo2BoBo	900	33	2001-2005	40,00	2,30	6x100
Lodz	Bo2Bo	1 000	15	2001-2002	29,5	2,30	4x100
Eskisehir	Bo2Bo	1 000	18	2003	29,5	2,30	4x105
Genève (cf. figure 10) (1)	Bo2BoBo	1 000	21	2004-2005	42,00	2,30	6x105
Bruxelles	Bo2Bo	1 435	47	2005-2008	31,85	2,30	4x105
Bruxelles	Bo2BoBo	1 435	19	2006-2007	43,22	2,30	6x105
Marseille	Bo2Bo	1 435	26	2006-2007	32,50	2,40	4x105
Valencia	Bo2Bo	1 000	20	2007-2008	32,50	2,40	4x105
Alicante	Bo2Bo	1 000	10	2007-2008	32,50	2,40	4x105
Innsbruck	Bo2Bo	1 000	22	2007	27,60	2,40	4x105
Palermo	Bo2Bo	1 435	17	2008-2009	32,50	2,40	4x105
Augsburg	Bo2BoBo	1 000	10 + 20	2009	40,00	2,30	6x105

(1) Les tramways de Genève circulent depuis 1862 mais les rames Bombardier « Flexity Outlook » ne sont en service que depuis 2005.

Tableau 6 – Caractéristiques générales du matériel Bombardier « Eurotram »

Réseau	Essieux	Voie (mm)	Nombre	Livraison	Longueur (m)	Largeur (m)	Puissance (kW)
Strasbourg	BoBo2Bo	1 435	36	1994-2000	33,10	2,40	12x26
Milan	BoBo2Bo	1 435	26	1998-2000	34,10	2,47	12x26
Strasbourg	BoBoBo2Bo	1 435	17	1998-2000	43,05	2,40	16x26
Porto (cf. figure 11) (1)	BoBo2Bo	1 435	72	2000-2004	35,00	2,65	12x26

(1) Les 72 Eurotrams de Porto sont une extrapolation directe du matériel de Strasbourg mais bénéficient du confortable gabarit de 2,65 m en largeur (GM).

Tableau 7 – Caractéristiques générales du matériel Bombardier GTX

Réseau	Type	Voie (mm)	Nombre	Livraison	Longueur (m)	Largeur (m)	Puissance (kW)
Brême	GT6N	1 435	1	1990	26,50	2,30	3x100
Munich	GT6N	1 435	3	1991	26,50	2,30	3x100
Brême	GT8N2	1 435	78	1993-1995	35,40	2,30	4x84
Berlin	GT6N	1 435	120	1994	26,50	2,30	3x100
Nuremberg	GT6N	1 435	14	1996	26,50	2,30	3x100
Zwickau	GT6M	1 000	12	1993	26,50	2,30	3x100
Frankfurt/Oder	GT6M	1 000	8	1994	26,50	2,30	3x100
Augsbourg	GT6M	1 000	11	1995	26,50	2,30	3x100
Brunswick	GT6S	1 100	12	1995	26,50	2,30	3x100
Jena	GT6M	1 000	19	1995-1996	26,50	2,30	3x100
Munich	GT6N	1 435	70	1995-1997	26,50	2,30	3x100
Mayence	GT6M	1 000	16	1996-1997	26,50	2,30	3x100
Nuremberg	GT8N2	1 435	26	1998	36,58	2,30	4x100
Munich	GT8N2	1 435	20	2000	36,58	2,30	4x100
Berlin	GT6N	1 435	45	2000-2001	26,50	2,30	3x100

Tableau 8 – Caractéristiques générales du matériel Bombardier – Alstom « Cobra »

Réseau	Type	Essieux	Voie (mm)	Nombre	Livraison	Longueur (m)	Largeur (m)	Puissance (kW)
Zürich	Be 5/6	A' + A'1/2A' + 1/2A'A' + A'	1 000	75	2001-2010	35,95	2,40	5x80



Figure 12 – Le plus original de tous : le tram « Cobra » de Zurich (photo E. Jordanis)

La caisse est construite en acier inoxydable et les cadres de bogies en acier Corten. Chaque bogie moteur comprend deux faux essieux coudés et surbaissés à l'extrémité desquels sont montées

des roues indépendantes. Sur chaque côté du bogie, suspendus au cadre, se trouvent deux moteurs de traction asynchrones disposés dos à dos, chaque moteur entraînant une roue.

Les caractéristiques générales du CAF sont celles du tableau 9.

1.10 Siemens « Combino »

Le Combino, construit de 1998 à 2004, est le premier type de tramway à plancher bas intégral, de construction modulaire à partir de trois éléments de base standardisés à l'extrême :

- les modules d'extrémité (ME), avec ou sans cabine de conduite aménagée ;
- les modules intermédiaires courts (MI) ;
- les grands compartiments voyageurs (CV) articulés avec les modules adjacents et s'appuyant sur ceux-ci.

Chaque module d'extrémité ou intermédiaire repose sur un bogie moteur (figure 14) ou porteur.

Les bogies sont montés de manière rigide sous leurs modules. Les bogies sont à châssis surbaissé et pourvus de quatre roues indépendantes. Le bogie moteur est pourvu sur chaque côté, à l'extérieur, d'un moteur de traction asynchrone de 100 kW, disposé longitudinalement et comportant, à chaque bout d'arbre, un réducteur pour les deux roues d'une même file rails.

Tableau 9 – Caractéristiques générales du matériel Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles CAF à plancher bas intégral

Réseau	Essieux	Voie (mm)	Nombre	Livraison	Longueur (m)	Largeur (m)	Puissance (kW)
Vélez-Málaga (figure 13)	Bo2Bo	1 435	3	2005-2006	31,26	2,65	8x61
Sevilla	Bo2Bo	1 435	17	2005-2007	31,26	2,65	8x61
Málaga	Bo2Bo	1 435	14	2007-2008	31,26	2,65	8x61
Vitoria	Bo2Bo	1 000	11	2008	31,26	2,65	8x61
Antalya TR	Bo2Bo	1 435	14	2009	31,26	2,65	8x61



Figure 13 – Tramway espagnol Vélez-Málaga (photo JM Valero)



Figure 15 – Tramway « Combino » d'Amsterdam (photo GM)



Figure 14 – Bogie moteur du « Combino » de Siemens avec les moteurs de traction longitudinaux entraînant deux roues indépendantes d'une même file de rails (photo GM)

La caisse est en éléments d'aluminium boulonnés afin de faciliter les réparations en cas d'accident grave. Les combinaisons suivantes ont été construites de manière standard :

- ME–CV–ME : 19,1 m à 20 m, 60 unités ;
- ME–CV–MI–CV–ME : 29 à 31,5 m, 290 unités (figure 15) ;
- ME–CV–MI–CV–MI–CV–ME : 41,9 m à 42,9 m, 78 unités.

Les caractéristiques générales du Combino sont données dans le tableau 10.

Après avoir constaté des fissures dans le pavillon de certains Combinos, notamment ceux à voie métrique et circulant sur des tracés avec des faibles rayons, Siemens a complètement repensé la technique de construction du Combino à partir des livraisons pour Budapest. La construction aluminium, avec éléments boulonnés, est abandonnée au profit de la construction en acier soudé inoxydable. Il n'y a plus de petits modules intermédiaires ou d'extrémité, mais uniquement des compartiments d'une longueur de 9 m environ ; les compartiments d'extrémité comprennent une cabine de conduite.

Pour les rames de 33 m, livrées au nouveau réseau du Sud du Tage, il n'y a plus que quatre caisses et trois articulations, celle du centre assurant également les passages en creux et bosse (figure 16). Chaque caisse repose, en son milieu sur un bogie, moteur ou non, qui peut, désormais, pivoter de 4°, en courbe, par rapport à l'axe de la caisse. De ce fait, les articulations sont beaucoup moins sollicitées que sur la version d'origine.

1.11 Siemens SGP – Elin « ULF »

ULF (Ultra Low Floor vehicle) concerne un type de tramway construit uniquement pour les tramways de Vienne, l'un des plus grands réseaux existants qui a la particularité que de nombreux arrêts sont dépourvus de quais, obligeant les voyageurs à monter dans les tramways depuis la chaussée pendant qu'une signalisation lumineuse protège le tramway à l'arrêt. L'usine SGP de Graz a développé un modèle spécial de tramway composé de caisses courtes articulées entre elles. Chaque articulation est formée d'un portique reposant sur deux roues, motorisées ou non, à orientation radiale contrôlée. Les roues motrices sont, chacune, entraînées par un moteur de traction asynchrone de 60 kW suspendu verticalement, dans le portique, sur le réducteur et la roue motrice.



Figure 16 – Tramway du Sud du Tage (Lisbonne) exploité par 24 Combinos de nouvelle génération qui ont bénéficié d'un design spécial pour les faces frontales (Siemens TS)

Le plancher est à la cote de 205 mm, un record absolu, et s'abaisse même à 180 mm aux seuils de portes. À l'arrêt, le véhicule est doté d'un dispositif d'agenouillement qui permet d'accéder au tramway sans difficulté depuis la chaussée.

Les caractéristiques générales du ULF sont données dans le tableau 11.

1.12 Stadler « Variotram / Variobahn »

Il s'agit, à nouveau d'un matériel modulaire, développé au début des années 1990, par ABB. Largement inspiré du matériel Eurotram en construction pour Strasbourg, le Variotram en constituait, dans l'esprit de ses concepteurs, une version simplifiée, donc moins chère, susceptible de pouvoir intéresser les anciens pays d'Europe centrale, l'ex-RDA en particulier, en vue de remplacer les motrices PCC tchèques.

Le Variotram se distingue de l'Eurotram essentiellement par sa chaîne de traction comportant des moteurs-roues. Rayé du catalogue lors de la reprise d'ABB, devenu ADtranz, par le canadien Bombardier, les droits de construction ont été repris par le constructeur suisse Stadler qui le produit dans son usine berlinoise de Pankow.

Les caractéristiques générales du Variotram sont données dans le tableau 12.

Tableau 10 – Caractéristiques générales du matériel Siemens « Combino »

Réseau	Essieux	Voie (mm)	Nombre + option	Livraison	Longueur (m)	Largeur (m)	Puissance (kW)
Potsdam	Bo2Bo	1 435	16°	1998-2001	30,50	2,30	4x100
Augsbourg	BoBo2Bo	1 000	41°	2000-2004	41,86	2,30	6x100
Fribourg/Br	BoBo2Bo	1 000	9°	1999	41,96	2,30	6x100
Hiroshima	Bo2Bo	1 435	12°	1999-2002	30,52	2,45	4x100
Bâle	BoBo2Bo	1 000	28°	2000-2002	42,86	2,30	6x100
Erfurt	Bo2Bo	1 000	7°	2000	30,52	2,30	4x100
Erfurt	Bo2Bo	1 000	29°	2002-2005	31,48	2,30	4x100
Erfurt	BoBo	1 000	12°	2002-2003	20,04	2,30	2x100
Nordhausen	BoBo	1 000	2°	2001	19,08	2,30	4x100
Nordhausen	BoBo	1 000	5°	2002-2003	20,04	2,30	4x100
Nordhausen	BoBo	1 000	3°*	2003	20,04	2,30	4x100
Amsterdam	Bo2Bo	1 435	152°	2001-2003	29,20	2,30	4x100
Amsterdam	Bo2Bo	1 435	4°	2002	29,20	2,30	4x100
Melbourne	BoBo	1 435	38°	2002-2003	20,04	2,65	4x100
Melbourne	Bo2Bo	1 435	21°	2003-2004	29,85	2,65	4x100
Berne	Bo2Bo	1 000	15°	2004	31,50	2,30	4x100
Ulm	Bo2Bo	1 000	8°	2003	30,83	2,40	4x100
Alicante/Valencia	Bo2Bo	1 000	10° + 16°	2005-2007	31,50	2,40	4x100
Sul do Tejo**	Bo'2'Bo'Bo'	1 435	24°	2006-2007	33,00	2,65	4x100
Budapest	Bo'2'Bo'Bo'2'Bo'	1 435	40°	2006-2007	53,99	2,40	8x100
° Combinos première génération, caisse alu				** Combinos nouvelle génération GTN, caisse acier			
* Bimodes avec groupe diesel embarqué				** Metro Sul do Tejo, Lisbonne, rive sud du Tage			

2. Tramways à plancher bas partiel ou à plancher haut

2.1 Alstom « Citadis »

Lorsque Alstom a lancé sa nouvelle gamme Citadis, le bogie moteur, permettant la construction d'un type de tramway à plancher bas intégral, était encore en cours de développement et, pour honorer ses commandes, le constructeur a réalisé une première série à plancher bas partiel, les bogies moteurs, de conception très classique, provenant de sa filiale allemande LHB à Salzgitter.

Les caractéristiques générales des Citadis première génération sont données dans le tableau 13.

2.2 Alstom LHB « NGT8 / MGT8 »

Ce matériel a été développé par Linke-Hofmann-Busch (LHB) avant que ce constructeur entre dans le giron d'Alstom. Le bogie moteur est de conception classique et est proposé pour la voie normale et la voie métrique (écartement de 1 m) ; ce bogie moteur équipe aussi les premiers Citadis pour Montpellier, Orléans et Dublin. La partie à plancher surbaissé représente 71 % de la longueur de la rame.

Le bogie porteur est pourvu de petites roues de 440 mm de diamètre et se retrouve sous les extrémités des Citadis 403 construits pour la CTS de Strasbourg.

Les caractéristiques générales de ces modèles sont données dans le tableau 14.

Tableau 11 – Caractéristiques générales du matériel Siemens SGP ULF

Réseau	Type	Essieux	Nombre	Voie (m)	Livraison	Longueur (m)	Largeur (m)	Puissance (kW)
Wien	A	1'A'A'A'	155	1 435	1995-2012	23,60	2,34	6x60
Wien	B	1'A'A'A'A'1'	145	1 435	1995-2012	34,90	2,34	8x60

Tableau 12 – Caractéristiques générales du matériel Stadler Variotram

Réseau	Voie (mm)	Nombre	Livraison	Longueur (m)	Largeur (m)	Puissance (kW)
Chemnitz	1 435	30	1993-2001	31,38	2,65	8x45
Sydney	1 435	7	1997-1998	28,02	2,65	8x45
Helsinki	1 000	40	1998-2003	24,40	2,30	12x45
Duisburg	1 435	1	1996	33,78	2,30	8x45
München	1 435	22	2007	33,78	2,30	8x45
Nürnberg	1 435	11	2007	33,78	2,30	8x45
Bergen	1 435	12	2009	32,18	2,65	8x45

Tableau 13 – Caractéristiques des Alstom Citadis de première génération

Réseau	Type	Voie (mm)	Nombre	Année	Longueur (m)	Largeur (m)	Places ass/total	Puissance (kW)
Montpellier I	401	1 435	30 (1)	1999-2002	40,96	2,65	70/230	4x140 + 2x120
Orléans	301	1 435	22	2000-2001	29,90	2,32	40/176	4x140
Dublin	301	1 435	(26)	2001-2002	29,70	2,40	56/221	4x140
Dublin	401	1 435	14	2002	40,80	2,40	80/310	4x140 + 2x120
Dublin	401	1 435	26 (2)	2007-2008	40,80	2,40	80/310	4x140 + 2x120

(1) à l'origine, 28 rames 301 + 2 rames en option, rallongées en type 401
 (2) proviennent du rallongement des 26 rames 301 en type 401

Tableau 14 – Caractéristiques générales du matériel Alstom LHB NGT8/MGT8

Réseau	Essieux	Voie (mm)	Nombre	Année	Longueur (m)	Largeur (m)	Places ass/total	Puissance (kW)
Magdebourg	Bo'2'2'Bo'	1 435	72	1994-2001	29,41	2,30	73/	4x95
Darmstadt	Bo'2'2'Bo'	1 000	38	1998-2006	28,00	2,40	81/215	4x95
Gera	Bo'2'2'Bo'	1 000	12	2006	29,40	2,40	80/173	4x95

Tableau 15 – Caractéristiques générales du matériel Bombardier « Classic »

Réseau	Type	Voie (mm)	Nombre	Livraison	Longueur (m)	Largeur (m)	Puissance (kW)
Cracovie	NGT6	1 435	26	1999-2001	26,00	2,40	4x85
Schwerin	NGT6	1 435	30	2002-2003	29,18	2,65	4x85
Dessau	NGT6	1 435	10	2002	21,45	2,30	4x85
Kassel	NGT8	1 435	32	2000	29,30	2,40	4x125
Essen	NGT6	1 000	34	2002-2003	28,00	2,30	4x85
Dresde	NGT12DD	1 450	49	2003	44,58	2,30	8x85
Halle	NGT6	1 000	30	2004-2005	20,55	2,30	4x85
Leipzig	NGT12	1 458	24	2005-2006	45,00	2,30	8x85
Dresde	NGT8DD	1 450	40	2006-2007	30,00	2,30	6x85
Frankfurt/Main	NGT8-S	1 435	60	2003-2007	30,00	2,40	4x105
Adélaïde (figure 17) (1)	NGT8	1 435	9	2005-2006	30,00	2,40	4x95
Norrköping	NGT8	1 435	5	2006	30,00	2,40	4x95
Brême (figure 18) (2)	GT8N-1	1 435	20	2005-2007	34,83	2,65	4x125

(1) Adélaïde a remplacé ses vénérables motrices de 1929 par des rames « Classic » de Bombardier.

(2) La ville hanséatique de Brême a abandonné la formule du plancher bas intégral, qu'elle avait exploré en premier en 1990, pour le modèle « Classic » de Bombardier.

2.3 Bombardier « Classic »

Il y a, parmi les réseaux « anciens », certains qui ont tiré la conclusion que les tramways à plancher bas partiel étaient plus intéressants à exploiter que leurs cousins à plancher bas intégral. Ils arguent, parfois non sans raison, que, longtemps, la seconde catégorie de matériels a été plus chère à l'achat que la première. Lorsqu'il faut acheter 20 ou 30 rames neuves par an, cette différence ne laisse personne insensible. Par ailleurs, si la zone à plancher bas représente au moins 70 % de la longueur du véhicule, comprenant toutes les plate-formes et toutes les portes, pour beaucoup de voyageurs, le fait de gravir deux marches pour aller dans les zones d'extrémité, n'est pas rédhibitoire, au contraire, car, moins encombrées, elles représentent une zone plus calme, très appréciée. Ce phénomène avait déjà été bien observé Grenoble en 1987 lors de la mise en service de la première ligne.

Il a, par ailleurs, établi que, suivant les revêtements de la plate-forme, un tramway à plancher bas peut générer, en roulant, un niveau sonore supérieur à celui émis par un tramway à plancher haut.

Enfin, beaucoup de techniciens d'atelier accordent, d'instinct, une confiance plus grande vis-à-vis des « vrais » bogies dotés de solides essieux et de toute la mécanique dont on peut comprendre d'emblée le fonctionnement par rapport à ces trains de roues indépendantes avec leurs transmissions mystérieuses et tous les problèmes nouveaux qui apparaissent sans avoir été connus à l'avance.

C'est dans ce contexte que Bombardier a décidé de développer un modèle de tramway, doté de tous les perfectionnements techniques, à plancher mixte sur la base d'une série de véhicules construits en 1999-2003, par l'usine Bautzen, pour Cracovie, Schwerin et Dessau.

Le modèle « Classic » est adapté aussi bien à la voie normale qu'à la voie métrique. Les modèles :

- NGT6 : 1 caisse motrice avec 2 bogies moteurs, articulée à 1 caisse avec 1 bogie porteur ;
- NGT8 : 2 caisses motrices avec 1 bogie moteur articulée à 1 caisse médiane sur 2 bogies porteurs ;
- NGT 12 : comme NGT8 mais avec 2 modules entre caisses motrices et caisse remorque.

La caisse est construite en acier inoxydable avec un pavillon en aluminium collé. Les bogies moteurs pivotent sous la caisse motrice et comportent deux moteurs de traction asynchrones qui entraînent par une transmission par arbre creux un essieu flanqué de roues motrices de 600 mm de diamètre. Les deux bogies porteurs, qui se trouvent sous la caisse remorque, comportent deux faux essieux coudés au bout desquels sont fixées des roues folles du même diamètre que les roues motrices. Entre les bogies moteurs, le plancher est à 360 mm au-dessus du rail mais s'abaisse à 290 mm aux seuils de portes. Il s'élève à 580 mm au-dessus des bogies moteurs. Suivant les désirs des clients, il est possible de mettre une porte simple dans le porte-à-faux avant mais la plupart réservent celle-ci à l'usage du conducteur. Les qualités de roulement et le confort de ce matériel, même à grande vitesse, sont remarquables.

Les caractéristiques générales du Classic sont données dans le tableau 15.

2.4 Bombardier « Flexity Swift »

Ce type de matériel, aux dimensions généreuses a été, avant tout, construit pour les réseaux voisins de Cologne et de Bonn. Il a été repris tel quel par le nouveau tramway de Croydon puis pour les extensions de Stockholm, le nouveau tramway d'Istanbul et les villes jumelles américaines de Minneapolis – St Paul. Le modèle K4500 est une version plus récente du type K4000.

Chaque rame se compose de deux caisses en acier reposant, chacune, sur un bogie bimoteur et s'appuyant sur une articulation les reliant à un très court élément central qui repose, lui, sur un bogie porteur. Le plancher est à 425 mm, avec un abaissement à 410 mm au seuil des portes, entre les bogies moteurs, soit sur 72 % de la longueur du véhicule. Au-dessus des bogies moteurs extrêmes, le plancher s'élève à 625 mm. La résistance frontale à la compression est de 600 kN.

Les caractéristiques générales du Flexity Swift sont données dans le tableau 16.

2.5 Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles (CAF)

Les caractéristiques générales du matériel CAF de première génération sont données dans le tableau 17.

En plus de sa gamme de tramways à plancher bas, CAF fournit régulièrement les réseaux nord-américains, très conservateurs, en tramways à plancher haut (figure 20).

2.6 Leoliner-Fahrzeugbau

Face à l'escalade de prix du matériel roulant neuf, la Compagnie des transports de Leipzig LVB et la société Siemens Transportation ont fondé, en 2002, une filiale commune visant la construction de tramways neufs, à plancher bas partiel, construits dans les ateliers LVB sous le nom de « Leoliner ». Deux rames articulées ont ainsi été construites en 2003.

Le Leoliner I est un véhicule articulé à deux caisses, en acier *Cor-Ten* soudé, de longueurs différentes. La partie arrière repose sur un bogie moteur et sur un bogie porteur. La partie frontale, plus courte, repose, à l'avant, sur un bogie moteur et, à l'arrière, sur une articulation flottante qui la relie à la caisse arrière. Au-dessus des bogies moteurs, le plancher est à la cote de 900 mm mais s'abaisse à 350 mm entre ces deux bogies, puis par deux courts plans inclinés à 6° passe sur le bogie porteur en s'élevant à la cote de 475 mm.

Les bogies moteurs, pourvus de deux moteurs de traction et de roues de 700 mm de diamètre, ont été récupérés sur des motrices PCC réformées et construites par Tatra en Tchéquie. Ils ont reçu une suspension primaire à ressorts mixtes métal-caoutchouc. Le bogie porteur est une construction neuve avec des roues de 550 mm. Les bogies moteurs pour Halberstadt sont une construction neuve.



Figure 17 – Tramway d'Adélaïde : rames « Classic » de Bombardier (photo P Labhart)



Figure 18 – Tramway de Brême : modèle « Classic » de Bombardier (photo BSAG)



Figure 19 – Tramway de Stockholm : modèle « Swift » de Bombardier (photo Bombardier)

Les caractéristiques générales du Leoliner sont données dans le tableau 18.

Tableau 16 – Caractéristiques générales du matériel Bombardier « Flexity Swift »

Réseau	Type	Voie (mm)	Nombre + option	Livraison	Longueur (m)	Largeur (m)	Puissance (kW)
Cologne	K4000	1 435	124	1995-2002	28,40	2,65	4x120
Croydon (Londres)	K4000	1 435	24	1998-1999	30,10	2,65	4x120
Stockholm (figure 19) (1)	A 32	1 435	53	1999-2008	29,70	2,65	4x120
Istanbul	A 32	1 435	55	2002-2003	29,70	2,65	4x120
Gouda (2)	A 32	1 435	6	2003	29,70	2,65	4x120
Minneapolis – St Paul	A 32	1 435	22 + 20	2003-2004	28,65	2,67	4x120
Cologne	K4500	1 435	74	2003-2008	28,40	2,65	4x120
Bonn	K4500	1 435	15	2003-2004	28,40	2,65	4x120
Porto	Metrô	1 435	30	2007-2008	37,12	2,65	8x125
Manchester	M5000	1 435	8 + 88	2008-...	28,40	2,65	4x120

(1) Avec le modèle « Swift » de Bombardier, le réseau de Stockholm a renoué avec une politique d'expansion du réseau tramway en correspondance avec le métro (Bombardier).

(2) Ancienne ligne NS cédée à la région de Leiden, exploitée par les tramways de La Haye.

Tableau 17 – Caractéristiques générales du matériel CAF de première génération

Réseau	Plancher bas	Voie (mm)	Nombre	Livraison	Longueur (m)	Largeur (m)	Puissance (kW)
Valencia	70 %	1 000	25	1994-1999	23,78	2,40	4x108
Lisbonne	70 %	900	10 (1)	1995	24,02	2,40	4x108
Bilbao	74 %	1 000	7	2002	24,40	2,40	4x98
Bilbao	74 %	1 000	1	2002	24,40	2,40	440 (2)

(1) 4 rames sous-traitées à SOREFAME, Lisbonne-Amadora.

(2) Rame prototype équipée d'un bogie moteur classique à 2x98 kW et d'un bogie moteur expérimental, pour le futur matériel à plancher bas intégral, à 4 moteurs de 61 kW.

Tableau 18 – Caractéristiques générales du matériel « Leoliner »

Réseau	Type	Essieux	Voie (mm)	Nombre	Livraison	Longueur (m)	Largeur (m)	Puissance continue (kW)
Leipzig	L6	Bo'2'Bo'	1 458	2 + 30	2006-2009	22,60	2,30	4x65
Halberstadt (figure 21) (1)	L6	Bo'2'Bo'	1 000	5	2006	21,00	2,30	4x65

(1) Modèle « Leoliner » développé pour les réseaux de tramways disposant de moyens financiers limités.

Tableau 19 – Caractéristiques générales du matériel Siemens « S 70 »

Réseau	Plancher bas	Voie (mm)	Nombre	Livraison	Longueur (m)	Largeur (m)	Puissance (kW)
Houston	70 %	1 435	18	2003-2004	29,40	2,65	4x140
San Diego	70 %	1 435	11	2004-2005	26,42	2,65	4x140
Île-de-France	68 %	1 435	15	2005-2006	36,68	2,65	4x200
Charlotte	70 %	1 435	16	2006-2007	27,72	2,65	4x140
Portland	70 %	1 435	21	2008	29,37	2,65	4x140



Figure 20 – Tramway de Sacramento, à plancher haut (photo J. Olaizola)

2.7 Siemens « Avanto 70 »

C'est le nouveau modèle standard à plancher bas partiel construit en Californie, pour le marché nord-américain. Le tram-train Aulnay-Bondy du réseau Transilien en est dérivé (cf. [D 5 552]).

Les caractéristiques générales de l'Avanto 70 sont données dans le tableau 19.

2.8 Stadler « Tango »

La Société Stadler a été fondée à Zurich en 1942 et, dès 1945, a commencé à produire des petites séries de locomotives de manœuvre diesel ou à accumulateurs. Dans son usine de Bussnang, en Suisse orientale, Stadler a pu, progressivement se lancer dans la fabrication d'automotrices électriques et diesel, en se spécialisant dans le matériel de transport régional suisse, mais la qualité des réalisations a ouvert des marchés à l'étranger (SNCF, Algérie, Pologne, Grèce, Italie, Hongrie). Les tramways de la gamme Variotram et Tango sont fabriqués dans une usine située à Berlin-Pankow.

Il s'agit d'une nouvelle gamme de matériel étudié en collaboration avec les deux réseaux de Bâle. La technique a intéressé la Région Rhône-Alpes qui a commandé six rames pour la future desserte rapide Lyon Part-Dieu – Aéroport Lyon Saint-Exupéry (Leslys).



Figure 21 – Tramway de Halberstadt : modèle « Leoliner » (photo H. Hondius)

Les caractéristiques générales du Tango sont données dans le tableau 20.

2.9 Tramways interurbains Stadler

La grande spécialité de Stadler demeure le matériel roulant pour dessertes régionales et, notamment les rames de banlieue, à crémaillère et les tramways interurbains.

Les caractéristiques générales des tramways interurbains sont données dans le tableau 21.

2.10 Métro-tram « Snelltram »

Les Snelltrams sont une spécificité hollandaise. Au pays de Rembrandt, trois villes ont conservé, après la deuxième guerre mondiale, leurs réseaux de tramways qu'elles ont modernisés avec des matériels de conception totalement différente. À la fin des années 1960, la fièvre du métro a gagné Rotterdam puis Amsterdam. Des travaux ont été entrepris puis, l'argent ayant manqué, ces villes se sont retrouvées avec des sections ou embryons de ligne qui souffraient de leur construction inachevée.

Tableau 20 – Caractéristiques générales du matériel Stadler « Tango »									
Réseau	Plancher bas	Disposition d'essieux	Voie (mm)	Nombre + options	Livraison	Longueur (m)	Largeur (m)	Places ass/total	Puissance (kW)
Bâle	75 %	Bo'2'Bo'2'Bo'	1 000	4 + 56	2009-2011	44,90	2,30	93/283	6x100
Bochum	(1)	Bo'2'Bo'	1 435	6	2007	28,20	2,65	66/175	4x125
Lyon	70 %	Bo'2'Bo'	1 435	6	2009	26,20	2,55	76/156	4x130

(1) pour lignes à quai haut (1 000 mm) uniquement

Tableau 21 – Caractéristiques générales du matériel Stadler interurbain

Réseau	Plancher bas	Voie (mm)	Nombre	Livraison	Longueur (m)	Largeur (m)	Puissance (kW)
OEG Mannheim	70 %	1 000	10 + 19	2002	30,53	2,40	4x95
Mannheim	70 %	1 000	10 + 10	2002	42,78	2,40	6x95
Heidelberg	70 %	1 000	8 + 25	2002	39,42	2,40	6x95
Ludwigshafen	70 %	1 000	8 + 16	2003	30,53	2,40	4x95
Zürich Forchbahn (figure 22) (1)	52 %	1 000	13	2004	24,15 (1)	2,40	4x100
St-Gall Trogenerbahn	58 %	1 000	2	2004	37,32	2,40	4x100

(1) Ces rames, bidirectionnelles, n'ont qu'une cabine de conduite et circulent en UM (unités multiples) dos-à-dos.

Les lignes de tramways bénéficiaient, par contre, de tracés, souvent séparés de la circulation générale, où des vitesses commerciales élevées rendaient ce mode de transport particulièrement attractif. La ville d'Utrecht, qui avait supprimé ses tramways en 1939, met en service, en 1983, deux longues lignes, à caractère interurbain, entre la gare centrale et les villes de Nieuwegein (13 km) et IJsselstein (15 km). Tracées en site propre, il est décidé d'équiper toutes les stations de quais hauts afin d'accéder, de plain-pied dans les rames qui étaient donc dépourvues des emmarchements traditionnels. Ce nouveau type de matériel fut baptisé « Snelltram », soit tram rapide. Le même matériel a été également construit, par la suite, pour le métro de Valencia, en Espagne.

Le principe du Snelltram a été repris par Rotterdam, où une première ligne de métro nord-sud a été ouverte en 1968, suivie par un axe ouest-est en 1982. Il a alors été décidé de greffer sur cet axe deux antennes, construites en surface, le long de la voirie, et de les exploiter avec des Snelltrams qui sont en fait des rames articulées dérivées du matériel métro mais pourvues d'un pantographe et de patins électromagnétiques. Quand un Snelltram pénètre sur le tracé du métro, son conducteur abaisse le pantographe et la rame prend son courant de traction par le troisième rail du métro.

Plus intéressante est l'exploitation de Snelltrams à Amsterdam qui a construit trois lignes de métro de 1977 à 1997. En 1990, une nouvelle extension du réseau tramway est mise en service entre le nouveau centre d'affaires Zuid WTC, où une gare d'échanges train-métro-tram est en construction, et la ville nouvelle d'Amstelveen. Ce prolongement de 4,2 km est construit en site propre au milieu d'un boulevard. Cette ligne est raccordée à Zuid WTC à la ligne 5, construite dans la voirie ordinaire, qui a son terminus nord à la gare centrale et est exploitée par des rames articulées avec caisse centrale à plancher bas. Cette ligne 5 a été rapidement saturée et, dans sa partie sud, elle est maintenant renforcée par la ligne Snelltram 51 avec qui elle partage une partie des voies (figure 23). Venant du sud et arrivée à Zuid WTC, la ligne 51 se sépare de la ligne 5 et s'embranché sur les emprises du métro qu'elle utilise sur 7,5 km, jusqu'à la gare centrale, en captant son énergie par le troisième rail.

Les Snelltrams sont à plancher haut pour desservir les stations du métro et sont au gabarit de 2,65 m contre 3 m pour le matériel métro. Sur le réseau métro, les Snelltrams relèvent une longue palette, le long de toutes les portes, pour combler la lacune de 18 cm subsistant entre chaque porte et le quai.

Lorsque le Snelltram 51 rejoint les voies du tramway 5, au gabarit de 2,35 m mais à plancher bas, les huit stations communes ont un quai divisé en deux zones, l'une avec des quais à la cote de 1 100 mm pour le 51, l'autre à la cote de 215 mm pour le 5, la transition entre les deux niveaux se faisant par cinq marches. C'est un exemple très réussi d'intégration de systèmes différents.



Figure 22 – Forchbahn : tramway interurbain à hautes performances qui pénètre dans Zurich sur les voies des tramways urbains (photo VBZ)



Figure 23 – Snelltram 51 d'Amsterdam circulant sur le tronçon commun partagé avec la ligne urbaine 5 exploitée avec des tramways à plancher bas (photo GM)

Tableau 22 – Caractéristiques générales des Snelltrams néerlandais

Réseau	Voie (mm)	Essieux	Nombre	Année	Constructeurs	Longueur (m)	Largeur (m)	Puissance (kW)
Utrecht	1 435	B'2'B'	27	1982-1983	SIG – Holec	29,80	2,65	2x249
Valencia	1 000	B'2'B'	40	1987-1990	CAF / MTM – BBC	29,80	2,55	2x188
Rotterdam	1 435	Bo'Bo'Bo'	71	1980-1984	Düwag – Holec	29,30	2,73	6x56
Amsterdam I	1 435	Bo'Bo'Bo'	25	1990-1994	Bombardier – Holec	30,60	2,65	6x74
Amsterdam II	1 435	Bo'Bo'Bo'	4	1997	CAF – Holec	30,97	2,65	6x90

Les caractéristiques générales des Snelltrams néerlandais sont données dans le tableau **22**.

dans la majorité des villes du Commonwealth, à l'exception de Calcutta. De nos jours, deux villes ont conservé cette survivance de l'Empire britannique, Hong Kong où la circulation s'effectue toujours à gauche, et Alexandrie. Dans les deux cas, les compagnies de tramways étaient à capitaux britanniques.

2.11 Tramways à impériale

Jusqu'à la quasi-extinction des réseaux de tramways britanniques en 1960, les modèles de tramways à impériale (deux niveaux) étaient la règle, non seulement en Grande-Bretagne mais aussi

Les caractéristiques générales des tramways à impériale sont données dans le tableau **23**.

Tableau 23 – Caractéristiques générales des derniers tramways à impériale

Réseau	Voie (mm)	Constructeur	Nombre	Livraison	Longueur (m)	Largeur (m)	Puissance (kW)	Places ass/tot
Alexandrie	1 435	Kinki Shario	6	1995	16,45	2,60	4x52,5	92/340 (1)
Hong Kong	1 067	Hong Kong Tramways	163	1990-2004	8,90	2,00	2x28	63/155

(1) 8 voyageurs / m²