

Tramways

par **Georges MULLER**

*Chef du service Études et Construction du Tramway à la Compagnie des Transports
Strasbourgeois*

1. Succès des nouveaux réseaux.....		C 4 440 - 2
2. Exploitation	—	2
3. Poste de commande centralisé (PCC)	—	3
4. Système d'aide à l'exploitation (SAE)	—	4
5. Gestion technique centralisée (GTC)	—	5
6. Information aux voyageurs	—	5
7. Signalisation.....	—	5
8. Maintenance	—	5
8.1 Tramways	—	5
8.2 Installations fixes.....	—	6
9. Infrastructures	—	7
9.1 Pose de voie	—	7
9.2 Rail	—	7
9.3 Tracé des voies.....	—	9
9.4 Appareils de voies	—	10
10. Ligne aérienne.....	—	10
11. Alimentation en énergie	—	11
12. Matériel Roulant.....	—	11
12.1 Évolution technologique	—	11
12.2 Conduite	—	15
13. Tramways en tout genre.....	—	15
13.1 Tramways conventionnels rallongés avec section surbaissée réduite ...	—	15
13.2 Tramways conventionnels avec section surbaissée d'origine.....	—	15
13.3 Tramways à plancher bas partiel de 2 ^e génération.....	—	16
13.4 Tramways à plancher bas partiel avec modules alternés.....	—	17
13.5 Tramways à plancher bas intégral.....	—	18
13.6 Remorques.....	—	20
13.7 Tramways à plancher haut.....	—	20
14. Trams-Trains.....	—	21
15. Métros légers	—	21
16. Esthétique	—	21
17. Tendances.....	—	22
Formulaire		Form. C 4 440
Pour en savoir plus		Doc. C 4 440

Après une longue période de déclin, dû autant au lobby automobile qu'à une absence de politique cohérente en matière d'aménagement urbain, le tramway revient en force, notamment dans les pays où il avait presque disparu. Son retour est souvent le catalyseur d'opérations d'urbanisme de grande envergure.

Cet article fait non seulement la synthèse des technologies utilisées dans la construction et l'exploitation des réseaux de conception récente mais aussi l'étude de tous les types de tramways, construits au cours des dix dernières années et des développements prévus à court terme.

Parti, avec succès, à la reconquête des villes, le tramway s'apprête aussi, dans des cas de plus en plus nombreux, à se substituer à certains trains régionaux, car il est plus économique d'exploitation et parce qu'il permet une liaison directe, sans rupture de charge, entre les régions et le centre des villes : c'est le tram-train.

Dans un glossaire placé en fin d'article sont définis les termes consacrés à ce type de transport.

1. Succès des nouveaux réseaux

Les principes qui prévalent à toutes les nouvelles réalisations de réseaux de tramway, plus particulièrement en Europe, peuvent se résumer ainsi :

- la construction d'un nouveau réseau de tramway comme catalyseur d'une importante opération d'urbanisme touchant la voirie, l'habitat, le tissu commerçant, etc. ;
- des lignes établies en site protégé ou en secteur piétonnier ;
- la priorité de passage des tramways sur tous les autres moyens de déplacement ;
- des fréquences de passage élevées ;
- la création de parkings relais pour les voitures établis le long des lignes.

Exemple : l'exemple strasbourgeois est sans doute le plus significatif sur la ligne A, mise en service le 25 novembre 1994, entre le quartier de Hautepierre et le centre commercial de Baggersee avant d'être prolongée le 4 juillet 1998 jusqu'à Illkirch-Graffenstaden.

Durant le dernier hiver avant les travaux, après une importante chute de neige, un comptage avait dénombré 18 000 voyageurs en une journée empruntant deux lignes d'autobus.

En 1999, par une journée ordinaire, la ligne A transporte plus de 80 000 voyageurs qui, tous, apprécient le confort, la rapidité, la ponctualité des tramways qui, avec une vitesse commerciale de 22 km/h, ne s'arrêtent qu'aux stations.

On constate également que les résidents établis le long des lignes nouvelles de tramway ont une nette tendance à conserver leur logement. Les entreprises, aussi, investissent pour s'établir le long des lignes nouvelles.

Enfin, on observe une progressive diminution du nombre de voitures circulant vers le centre, beaucoup d'automobilistes utilisant désormais les parkings relais et le tramway.

2. Exploitation

L'exploitation d'un réseau de tramway s'apparente beaucoup plus à celle d'un métro même si les tramways roulent en surface comme les autobus.

La règle de base est la conduite à vue, c'est-à-dire que le **conducteur** reste maître de la marche de sa rame tout en devant respecter absolument les signaux.

Pour conduire une rame de tramway, il n'est pas nécessaire de posséder un permis de conduire, catégorie transport en commun, mais la grande majorité des conducteurs viennent généralement des autobus. Après une formation théorique et pratique, où le niveau requis est très précis, les candidats passent un examen complet au terme duquel une habilitation à la conduite des tramways leur est octroyée s'il n'y a pas eu de faute commise.

Informé préalablement de son affectation, le conducteur prend son service à l'heure voulue et va prendre possession de la rame que l'on a prévue pour lui. Il procède alors à la préparation de sa rame à partir de la cabine de conduite qu'il va utiliser. À cette fin, il utilise une clé spéciale qui manœuvre un commutateur, généralement à 4 positions : 0 – Préparation – Manœuvre – Marche. Durant la phase de préparation, les circuits électriques sont progressivement alimentés en énergie et, simultanément, testés, les défauts éventuels apparaissant sur l'écran de diagnostic.

Le conducteur, après avoir vérifié le fonctionnement de quelques organes essentiels tels que l'éclairage, le timbre, les sablières, les patins électromagnétiques, etc., vérifie le bon fonctionnement des commandes de la cabine opposée, dans le cas d'une rame bidirectionnelle. Il procède enfin à un examen visuel de sa rame, prévient, par radio, le régulateur qu'il est prêt à s'injecter en ligne puis attend que le signal de sortie passe au vert. La rame quitte alors le remise, teste encore la télécommande d'aiguillage puis quitte le dépôt pour assurer le service commercial prévu en ligne.

À partir de cet instant le conducteur devra respecter l'horaire prévu au graphique. Les tramways sont légalement des véhicules prioritaires mais leur circulation peut être perturbée si deux mesures essentielles ne sont pas prévues à la conception du réseau : le site propre intégral et la prise en compte aux feux.

Le site propre désigne la plateforme sur laquelle sont posées les voies et qui doit être protégé des autres véhicules par des marques désignant le gabarit limite d'obstacles au moyen de bandes en couleur ou de bordures ; c'est un choix architectural.

La prise en compte aux carrefours garantit le passage libre aux rames de tramway sur tous les autres véhicules. Souvent on dispose une boucle de détection entre les rails une centaine de mètres avant le carrefour. Au passage d'un tramway, un signal est envoyé à l'armoire à feux pour interrompre le cycle normal et assurer le passage libre en toutes circonstances ; c'est la conséquence d'un choix politique.

Historique

Le tramway est une invention américaine puisque la première ligne de ce genre est ouverte en 1832 entre New York et Harlem ; la traction est assurée par des chevaux.

En 1853, un ingénieur français établi aux États-Unis, Alphonse Loubat, invente le rail à gorge noyé dans la chaussée et obtient la concession pour construire et exploiter une ligne de tramways hippomobiles dans Broadway.

Rentré en France quelques mois plus tard, A. Loubat se démène pour obtenir la concession d'une première ligne de « chemin de fer américain » à Paris. Une première section expérimentale est ouverte au public en janvier 1854 entre la place de la Concorde et la barrière de Passy.

La traction hippomobile a cependant un mauvais rendement et exige une gestion complexe et délicate des chevaux.

En 1878, la ligne Rueil – Marly-le-Roi est exploitée par des rames tirées par de petites locomotives à vapeur.

La qualité du service et la vitesse des convois, qui comportent jusqu'à trois voitures, poussent les autres compagnies à remplacer progressivement les chevaux par des locomotives ou des automotrices à vapeur.

En 1881, l'ingénieur allemand Werner von Siemens fait circuler dans un quartier de Berlin le premier tramway électrique alimenté par les deux rails de roulement.

En France, on compte jusqu'à cent quatorze réseaux urbains, en 1913, mais c'est aux États-Unis que le tramway est roi puisque près de 63 000 motrices électriques parcoururent, en 1917, 41 600 km de voies.

En France, la concurrence automobile commence vraiment à faire de l'effet vers 1929-30. Les réseaux urbains ont vieilli et à quelques exceptions près, on n'achètera pratiquement plus de tramways neufs, à commencer par la ville de Paris qui, en 1929, décide de supprimer ses cent trente lignes, ce qui sera effectif en 1938.

En 1936 apparaissent à Brooklyn, les premiers exemplaires de la légendaire motrice PCC, abréviation de Electric Railway Presidents Conference Committee. Il se construira, de 1936 à 1951, 4 767 motrices PCC en Amérique du Nord.

En France, l'industrie ferroviaire ne s'intéresse pas à un matériel comparable et les constructions neuves, après-guerre, sont marginales.

Aux États-Unis, le massacre a été d'une grande envergure puisque General Motors crée une filiale d'exploitation qui vient offrir ses services lors de tout renouvellement de concession et dont la première tâche est de remplacer les tramways par des autobus diesel, même si les coûts d'exploitation augmentent systématiquement.

Le déclin des tramways était venu de l'autre rive de l'Atlantique, de la même rive viendra la renaissance. Au Canada d'abord où Edmonton remet en service, en 1978, une première ligne de tramway.

En 1981, Calgary et la ville californienne de San Diego emboîtent le pas et dans les deux cas on pose les voies dans les rues au détriment de l'espace automobile. Le mouvement est lancé et de nombreuses villes américaines rejoignent le club des nouveaux réseaux de tramway.

En France aussi le retour du tramway s'amorce enfin. La ville de Nantes décide de se lancer dans l'ère du tramway moderne.

Le tramway de Grenoble fait école pour son aspect urbanistique et aussi par la concertation constante entre élus et habitants.

Ainsi le tramway fait-il son retour dans la région parisienne, entre Saint-Denis et Bobigny (1992), à Rouen et à Strasbourg (1994), dans le Val-de-Seine, entre La Défense et Issy-Plaine (1997), à Montpellier, Orléans et Lyon (2000) tandis que les constructions vont démarrer au cours de l'an 2000 à Bordeaux et Valenciennes et que des décisions en ce sens ont été prises au Mans, à Mulhouse, à Toulon et à Nice.

3. Poste de commande centralisé (PCC)

Le conducteur n'est cependant pas isolé puisqu'il est relié au **Poste de commande centralisé (PCC)** par radiotéléphone et par le **Système d'aide à l'exploitation (SAE)**. Enfin le contact humain direct est assuré par la présence, sur le terrain, du Responsable de ligne (RL), qui est affecté en permanence à une ligne donnée.

Arrivé au terminus, le conducteur dispose d'un temps de battement nécessaire pour sa détente. À l'heure exacte prévue un signal sonore l'avertit de l'ordre de départ.

La sécurité des voyageurs passe par l'activation de la veille automatique (VA). Un tramway est pourvu d'une boucle de sécurité, câblée, qui parcourt l'ensemble de la rame, sous une alimentation flottante double 24 V. Cette boucle comporte, en série, des contacts reliés à des éléments concourant à la sécurité durant la marche.

L'état de cette boucle est contrôlé en permanence par la logique embarquée qui évalue les erreurs possibles et intervient, en cas de défaut, tel que l'ouverture intempestive d'une porte, en provoquant le freinage d'urgence.

Dans le manipulateur, on trouve une touche que le conducteur doit presser et relâcher toutes les 8 à 10 s en moyenne : c'est la VA. Si le conducteur a un malaise et n'actionne pas à temps la touche de la VA, la boucle de sécurité s'ouvre et la rame s'arrête en urgence.

En cas de défaut technique, le conducteur peut, après autorisation du PCC, inhiber la boucle mais ne peut redémarrer qu'avec un assistant auprès de lui et après avoir invité les voyageurs à quitter le tram.

Le PCC est le cœur de l'exploitation d'un réseau de tramway. Un **régulateur** suit la progression des rames de tramway sur un écran cathodique où sont matérialisées les deux voies d'une ligne, les stations les plus importantes et des repères qui indiquent la position de chaque rame en service avec son numéro de service et le nombre de minutes d'avance ou de retard par rapport à l'horaire.

La localisation des rames se faisait jusqu'à récemment par des signaux radio émis par une roue phonique, disposée sur l'un des bogies, qui sont transmis à l'ordinateur central lequel transforme ces signaux en distance. Cette technologie cède à présent la place au guidage par satellite d'une plus grande précision.

Le régulateur n'intervient pas, en principe, sur la sécurité mais s'efforce d'assurer un intervalle aussi régulier que possible des rames en ligne. Grâce au système informatique existant, il peut faire apparaître sur son écran des informations complémentaires concernant une rame donnée : le nom du conducteur, l'heure de sa prise de service, l'heure de sa relève et le nom de son remplaçant, etc.

Il peut, à tout moment, appeler un conducteur donné par le radiotéléphone et dialoguer avec lui. Inversement, chaque conducteur est tenu d'appeler le PCC pour lui signaler un incident donné ; il appartient alors au régulateur de lui indiquer les directives qu'il juge nécessaires : échange de la rame, stationnement prolongé au terminus dans l'attente de l'équipe d'intervention, retour haut-le-pied jusqu'au dépôt, etc.

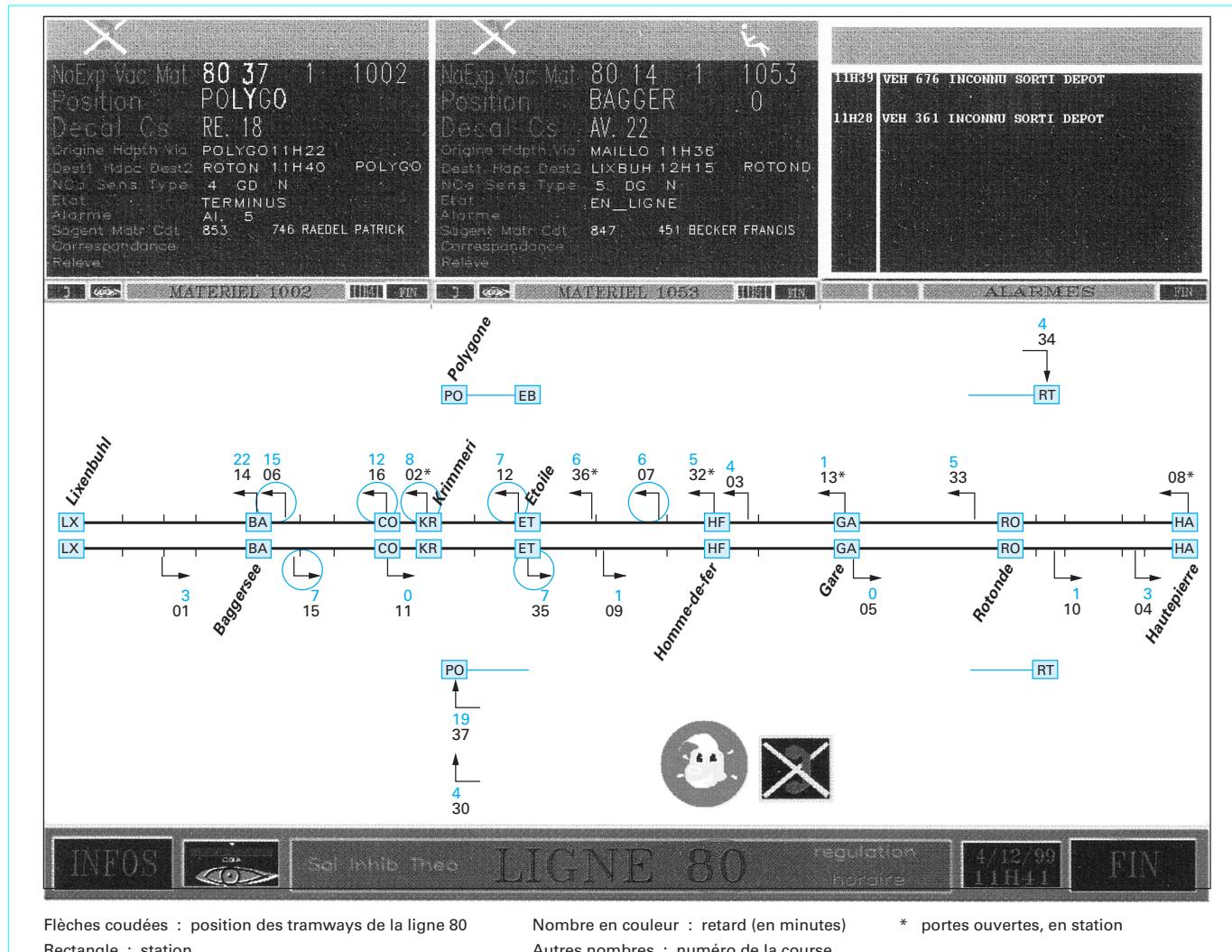


Figure 1 – Suivi par le régulateur en temps réel des tramways sur la console du SAE

Des caméras disposées aux points stratégiques des lignes renvoient des images sur des écrans afin de compléter les informations nécessaires au régulateur.

conducteur, en clair et en permanence, les dérives éventuelles par rapport à l'horaire.

Afin d'éviter d'encombrer le canal phonique, le régulateur du PCC peut aussi informer, par l'écran SAE de la cabine de conduite, un groupe de rames d'un incident d'exploitation : « Place Kléber infranchissable », par exemple, évitant ainsi aux conducteurs d'aggraver la situation.

Les principales fonctions du SAE généralement en place sont :

- pour le régulateur, la position et la progression des rames en ligne (figure 1) lui permettant d'intervenir et de prendre un certain nombre de décisions, connaître le degré d'occupation d'une rame, etc. ;

- pour le conducteur, connaître sa position par rapport à l'horaire, recevoir des informations spéciales ainsi que le départ sur ordre aux terminus ;

- pour les voyageurs : entendre, par synthèse vocale, le nom de la prochaine station et de lire la même information, éventuellement détaillée au niveau des correspondances, sur des afficheurs lumineux dynamiques.

4. Système d'aide à l'exploitation (SAE)

Le SAE est un **système de transmission de données entre tous les mobiles du réseau**, tramways et autobus, et le PCC. Une base radio permet d'assurer la couverture générale aérienne des canaux pour la phonie.

Chaque tramway en ligne transmet donc sa position instantanée, que le calculateur transforme en variation par rapport à l'horaire théorique. Dans la cabine de conduite, un petit écran indique au

5. Gestion technique centralisée (GTC)

La GTC est un réseau de communication en fibre optique assurant, à partir du PCC, la **télésurveillance et la télécommande** de l'ensemble des équipements du système tramway le long de la ligne, c'est-à-dire :

- la signalisation en ligne ;
- l'état des distributeurs de titres de transport en station ;
- les alarmes pour effractions ;
- la détection incendie dans les locaux techniques ;
- les équipements électromécaniques divers ;
- le préchauffage des aiguillages en hiver ;
- la gestion des principaux défauts dans une sous-station de traction afin d'assurer le maintien de l'alimentation en énergie de traction, etc.

L'ensemble des informations recueillies est traité dans un centre de calcul, généralement disposé au PCC et le régulateur dispose de consoles en couleur lui indiquant l'état des équipements avec la possibilité, pour lui, d'obtenir des informations très détaillées sur un incident donné.

6. Information aux voyageurs

L'information à destination des voyageurs se fait généralement à deux niveaux.

Sur les **quais des stations**, des écrans informent les voyageurs du temps d'attente pour les prochaines rames. En cas de perturbation, une personne, formée sur un profil commercial, alertée par le régulateur, avertit par des diffuseurs de son les voyageurs sur les quais sur la nature de l'incident, des mesures prises provisoirement (mise en place d'autobus de substitution, par exemple) et du temps estimé pour la reprise normale du trafic.

À l'**intérieur des rames**, des annonces par synthèse vocale, ainsi que des afficheurs lumineux, renseignent sur la prochaine station. Le PCC ou les conducteurs peuvent également donner des informations à la clientèle, notamment en cas d'incident.

7. Signalisation

Pour assurer la sécurité de circulation, les lignes de tramways sont équipées d'une signalisation qui leur est propre et qui tient compte du principe de la marche à vue. Cette signalisation est préconisée par l'Union internationale des transports publics (UITP) et elle est obligatoire dans la majorité des pays européens.

On distingue :

- la signalisation aux carrefours (figure 2) où les feux tricolores sont remplacés, pour les tramways, par des barres lumineuses sur fond noir pour éviter les interprétations erronées de la part des automobilistes ;
- la signalisation ferroviaire de sécurité, assurée par signaux tricolores dont le rouge est absolument infranchissable, sauf avec l'accord du PCC ; ces signaux sont généralement utilisés dans les zones de manœuvre ou dans les sections en site propre intégral, par exemple dans un tunnel ;
- une signalisation fixe, généralement sous forme de petites plaques, suspendues aux transversaux de la ligne aérienne ou fixées sur des poteaux, indique aux conducteurs la vitesse maximale à respecter.

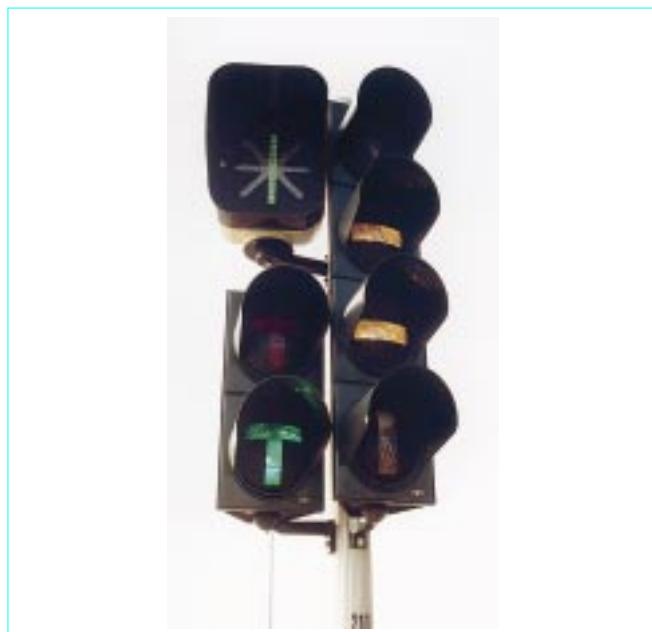


Figure 2 – Signalisation lumineuse des tramways aux carrefours (Strasbourg)

8. Maintenance

8.1 Tramways

La maintenance des tramways se fait dans l'enceinte d'un établissement dénommé **dépôt**. Celui-ci comprend généralement deux zones distinctes : le remisage avec ses annexes techniques et l'atelier.

La zone de remisage est constituée d'un faisceau de voies où stationnent les rames réputées bonnes pour être mises en service commercial. Il n'est pas indispensable de couvrir cette zone puisque, avant la prise de service, il est possible de préchauffer et dégivrer les rames par leur simple préparation.

Le **remisage** est généralement très proche de la station service, local, maintenu hors-gel, où l'on trouve :

- une machine à laver par brosses, laquelle peut être fixe ou mobile ;
- un aspirateur fixe pour le nettoyage intérieur ;
- une centrale à sable destinée à remplir les sablières disposées au-dessus des roues motrices.

L'**atelier** est équipé de voies aménagées pour la maintenance, préventive et curative, et les réparations.

La **maintenance préventive** est préconisée par le constructeur du matériel roulant et ses sous-traitants. Il en résulte des gammes qui se font souvent sur un multiple de 5 000 km :

- 5 000 km : examen général de la rame, des plaquettes de freins, du pantographe, des principaux organes électromécaniques, contrôle des niveaux, etc. ;
- 15 000 km : nettoyage des filtres à air, contrôle et graissage des mécanismes de portes, reprofilage des bandages de roues, examen des bogies, refroidissement des onduleurs et des moteurs de traction, etc. ;

— 30 000 km : contrôle de tous les éléments des cabines de conduite, révision des centrales hydrauliques des freins mécaniques, examen des disques des freins mécaniques, remplacement de panneaux d'habillage fatigués, etc. ;

— 60 000 km : contrôle de l'armature des sièges, des baies vitrées, des éléments de chauffage et d'air conditionné, vidange des réducteurs, examen des bogies, etc. ;

— 120 000 km : contrôle des revêtements de plancher, de tous les auxiliaires et de leurs accessoires, de l'appareillage électrique de protection, renouvellement de la batterie de l'enregistreur de marche, contrôle de toutes les armoires électriques, etc. ;

— 240 000 km ; etc.

Les listes des opérations sont cumulatives : une révision après 15 000 km comprend toutes les opérations énumérées dans la révision des 5 000 km.

Pour les **opérations courantes de maintenance**, on trouve dans l'atelier un certain nombre de voies munies de fosses de visite pour l'accès aux organes de frein, aux roues, aux moteurs de traction et à leurs organes de transmission, aux patins électromagnétiques.

Depuis l'arrivée des tramways à plancher bas à Grenoble en 1986, les équipements électriques et électroniques nécessaires à la traction et au freinage, ainsi que les auxiliaires, sont disposés en toiture (figure 3), ce qui implique de doubler les voies sur fosse de passerelles, situées à environ deux mètres au-dessus du sol, pour permettre d'accéder aux coffres abritant l'appareillage électrique et aux blocs produisant le chauffage, la ventilation et la climatisation.

Un pont roulant, dont la manœuvre doit être liée à la mise à la terre de la ligne aérienne de la voie concernée, permet d'extraire les coffres électriques de la toiture et de les transporter à l'atelier spécialisé. Ces passerelles sont strictement réservées au personnel habilité à ces travaux.

Un élévateur à train, ou un jeu de colonnes élévatrices, permet les opérations de levage nécessaires pour retirer les bogies d'une rame afin de procéder à leur nettoyage, à leur révision ou à une intervention plus lourde.

Le tour en fosse est un outil indispensable pour maintenir le matériel roulant en bon état général. Il s'agit d'une très grosse machine, à commande numérique dont la fonction est de **reprofilier les bandages des roues**. Chaque exploitant fixe, après une période expérimentale de quelques mois, la périodicité de cette opération. Pour cela, il faut tenir une fiche du vieillissement de tous les bandages du parc.



Figure 3 – Maintenance des équipements électriques en toiture (Strasbourg)

Cette observation est très importante car, si l'on reprofile les bandages après un délai trop long, il faut, au tournage, enlever une quantité de métal telle que la durée de vie des bandages sera raccourcie.

Le problème est que suivant le profil de la ligne et du type de matériel roulant, les variations d'usure peuvent être considérables d'un réseau à l'autre. Il faut donc procéder par tâtonnement pour essayer de fixer l'intervalle optimal aboutissant à une longévité maximale des bandages ; la fréquence de ces opérations varie, suivant les conditions locales, de 13 000 km à 25 000 km.

On amène le premier bogie sur le tour en fosse et l'opérateur détermine quelle est la paire de roues la plus abîmée ; ce sont elles qui serviront de référence pour que le bogie ressorte équilibré.

On bride le bogie à un support fixe, le coupon de rail s'escamote, des galets entraînent deux roues d'un même essieu et des couteaux entament leur travail de rectification sur les bandages et les boudins, sur la base du programme imposé par le tourneur.

À la fin de l'opération, les bandages sont à l'état neuf, au diamètre près.

La vie d'un bandage varie de 120 000 km à 300 000 km, selon la nature des lignes.

Un atelier de tramway comprend naturellement aussi les machines-outils les plus classiques mais surtout des **bancs-test** pour les freins mécaniques, les pantographes, les appareils de puissance tels que les onduleurs ou les convertisseurs statiques.

Les logiques à relais ayant cédé la place aux logiques programmées, le personnel de maintenance est à présent doté de valises-test à l'aide desquelles on peut facilement modifier des paramètres.

Les interventions sur les cartes électroniques restent souvent limitées au premier niveau car les bancs-test pour ces cartes ont un coût d'acquisition qui ne se justifie pas pour beaucoup de réseaux de tramways qui se limitent à repérer la carte défectueuse, de la renvoyer au fournisseur et de procéder à son remplacement.

La **cabine de peinture** reste encore indispensable pour maintenir l'aspect extérieur en bon état. Depuis l'apparition des matériaux modulaires, on peut s'équiper de cabines de plus petites dimensions. Elles sont généralement doublées d'un petit atelier réparant les pièces en polyester qui se sont de plus en plus imposées dans l'habillage intérieur et extérieur des tramways récents.

Les réseaux de tramways ne manquent pas, enfin, de s'équiper d'une **voie d'essai** sur laquelle on envoie la rame sortant de révision ou de réparation sans risquer de perturber l'exploitation.

8.2 Installations fixes

La maintenance des installations fixes est avant tout préventive :

- le contrôle visuel régulier de la ligne aérienne, de la voie et de la plateforme, le relevé de l'évolution de l'usure ;
- le curage régulier de la gorge des rails afin d'éliminer la terre et les petits objets, à l'aide d'une éboueuse sur rails ou sur pneus ;
- la vidange des boîtiers de drainage ;
- le graissage des organes mobiles de la timonerie mobile des aiguillages ;
- le contrôle de la signalisation de sécurité ;
- le nettoyage et le contrôle des organes de commutation à l'intérieur des sous-stations.

En alignement, un rail peut avoir une durée de vie de 15 à 20 ans suivant le nombre de circulations. En courbe, on est conduit à le recharger, c'est-à-dire à compenser, par apport d'un cordon en acier, la matière qui a été usée.

En revanche il faut, plus fréquemment, éliminer l'usure ondulatoire à la surface des rails par un meulage et un reprofilage réguliers, tous les deux à trois ans, à l'aide d'une meuleuse.

Les grands réseaux possèdent une meuleuse automotrice électrique permettant de parcourir chaque ligne une fois par mois environ ; les réseaux plus modestes font appel à des entreprises spécialisées.

9. Infrastructures

Les tramways roulent sur une infrastructure particulière composée de la **plateforme** et de la **voie ferrée**.

9.1 Pose de voie

Il y a de nombreuses variétés de type de pose de voie mais l'augmentation constante de la charge par essieu des matériels roulants (4,5 t en 1945/10 t en 1995) a conduit les récentes réalisations à investir dans des infrastructures très résistantes afin de garantir un roulement stable et une durée de vie aussi longue que possible.

La voie ferrée classique sur ballast avec rail Vignole est rarement utilisée en ville en raison des problèmes d'insertion ; elle est par contre toute indiquée pour les sections extérieures en site propre intégral (Lille – Roubaix – Tourcoing, Nantes, Val-de-Seine, etc.).

Un bon compromis est le type de **pose de voie, mis au point par la SEMALY avec le groupement COGIFER** pour supporter efficacement le passage fréquent de rames dont la charge par essieu peut atteindre environ 11 000 daN en capacité en charge exceptionnelle (8 voyageurs/m²), appliquée notamment à Grenoble, Strasbourg, Genève et Montpellier.

Une opération préliminaire importante consiste à dévier les réseaux publics (eau, assainissement, gaz, téléphone, électricité) qui se trouvent dans l'espace prévu pour la plateforme jusqu'à une profondeur de 1 m environ.

Une fois cette opération terminée, la chaussée est décaissée sur une profondeur de 85 cm environ et sur une largeur moyenne de 6 m.

Une fois le fond de fouille compacté et les parois protégées contre les intempéries, on coule un béton maigre dosé à 200 kg/m³, ratissé, sur une épaisseur de 29 cm environ.

Après séchage, on effectue le piquetage de la voie et on dépose, tous les 75 cm, des traverses bi-blocs en béton équipées d'attachments élastiques Nabla composées d'une butée isolante en nylon prenant appui sur le patin du rail et sur l'épaulement de la traverse ainsi que d'une lame élastique qui maintient en pression la butée isolante sur le patin du rail. Le non-desserrage de l'ensemble est assuré par un écrou auto-freiné (figures 4 et 5).

On dispose alors, dans chaque table d'appui des traverses, une semelle en caoutchouc, épaisse de 9 cm, qui va supporter le patin du rail et assurer un rôle amortisseur. On pose les rails, livrés en coupons de 18 m, qui sont fixés verticalement sur les traverses puis soudés entre eux par aluminothermie. Une fois les rails soudés, on soulève, à l'aide de vérins, l'ensemble du travelage jusqu'à la cote calculée puis on coule un béton de calage, dosé à 350 kg/m³ taloché horizontalement ou avec des pentes selon les revêtements prévus, jusqu'à se rapprocher du sommet des traverses sans toutefois atteindre ce dernier afin de laisser les rails hors de la couche de béton pour faciliter leur remplacement le moment voulu.

Avant de remblayer la plateforme, on comble le vide sous le rail avec du polystyrène expansé tandis que les attaches et boulons de fixation sont protégés par un capot. Les chambres d'éclissage du rail sont remplies par un matériau imputrescible qui est soit de la mousse de polyuréthane soit de l'azobé dans les zones où la plateforme est sollicitée par le trafic routier.



Figure 4 – Construction d'une voie de tramway (Strasbourg)

Dans les zones proches des habitations, on améliore l'isolation acoustique par deux moyens techniques. Si l'immeuble se trouve de 7 m à 12 m de la voie, l'affaiblissement vibratoire doit être de 10 dB et on utilise la pose ASP (affaiblissement par Sylomer précontraint). Le rail, s'appuyant sur une selle métallique par l'intermédiaire d'une semelle de caoutchouc de 4,5 mm d'épaisseur, est immobilisé par deux griffons Nabla solidaires de la selle. On interpose entre celle-ci et le bloc du Sylomer ; ce matelas, compressible et mis en précontrainte, amortit les vibrations provoquées par le roulement des trams.

Lorsque les habitations sont à moins de 7 m de la voie, on applique le principe de la dalle flottante. Sur toute la surface de la couche de béton maigre, on dépose un matériau résilient, polystyrène expansé ou tapis de Sylomer, sur lequel on coule le béton de calage ; le jointage vertical de la plateforme est également assuré par un matériau résilient tel que le polystyrène expansé.

Pour mémoire, le Sylomer a été développé pendant la construction de la ligne du métro de Vienne, qui passe à faible distance de l'Opéra, afin de filtrer toutes les vibrations engendrées par le roulement des rames en souterrain.

Tous les 35 m environ, le fond de gorge des rails est percé d'une lumière afin de permettre à l'eau de pluie de gagner un boîtier de drainage lui-même relié à un drain latéral communiquant avec le réseau local d'assainissement.

Afin de diminuer la résistance électrique du circuit de retour du courant de traction, les rails sont mis en parallèle tous les 100 m par un câble de cuivre de 120 mm².

Un câble de cuivre de 240 mm², soudé sur chaque file de rail, sert de raccordement négatif avec la terre de chaque sous-station de traction établie le long de la ligne.

Le revêtement final de la plateforme est un choix architectural : dalles, pavés, gazon, sablé, etc.

La plateforme contient également un réseau multitudinal formé de gaines contenant les réseaux électriques pour la signalisation, les télécommunications, l'arrosage du gazon, etc.

9.2 Rail

Le rail utilisé, lorsque la voie est établie dans la chaussée, est un rail à gorge qui évite que des débris ne gênent le passage des roues. Les principaux profils de rails à gorge utilisés ont les caractéristiques suivantes.

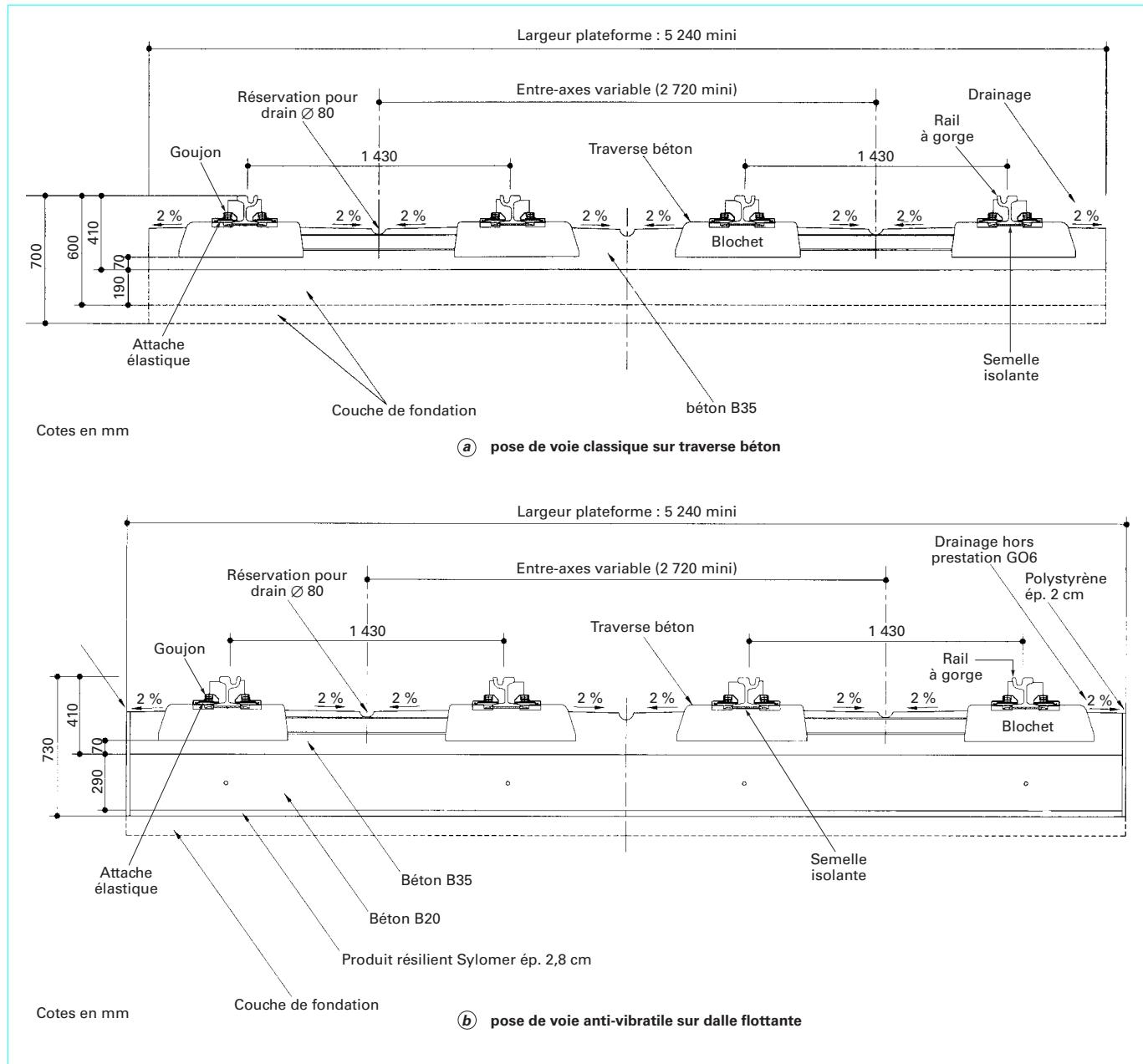


Figure 5 – Coupe type de différents types de plateformes à Strasbourg (GETAS)

Type	35 G	41 GP
masse linéique (kg/m)	54,78	55,34
hauteur (mm)	152,50	152,50
largeur gorge (mm)	36	41
profondeur gorge (mm)	40	45,9

Le profil 35 G (figure 6 a) est un rail développé par COGIFER pour les réseaux urbains classiques. Le profil 41 GP (figure 6 b) a été retenu pour les réseaux qui envisagent de faire circuler des tramways d'interconnexion sur les voies de chemin de fer, comme à Strasbourg.

Les rails 35 G et 41 GP sont laminés par le procédé de laminage universel. À partir d'une ébauche synthétique obtenue par laminage classique en cannelures, on leur fait subir une succession de passes universelles entre deux cylindres à axe horizontal et entre deux galets à axe vertical.

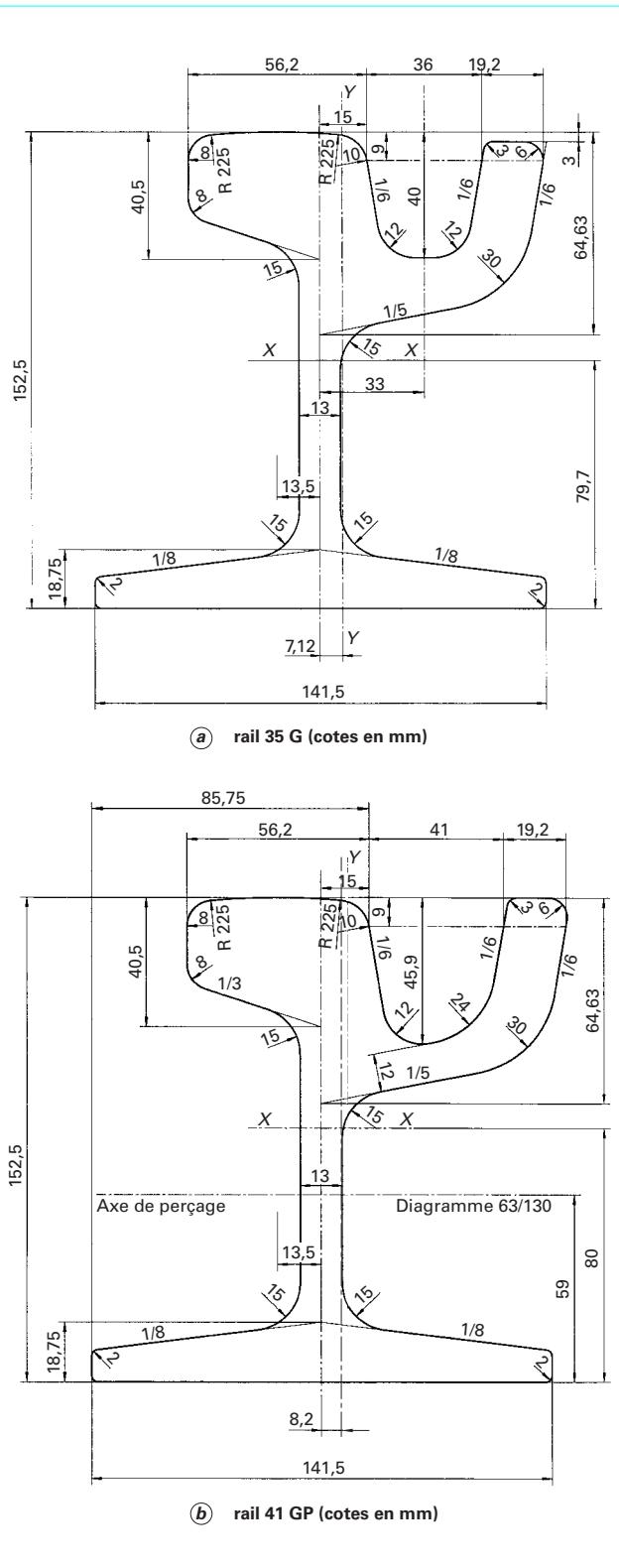


Figure 6 – Coupes de rails 35 G et 41 GP (COGIFER)

Chaque passe est suivie d'une passe refouleuse. Les allongements, très importants, au départ, provoquent un très bon forgeage de l'acier.

Le laminage universel procure, par rapport au laminage classique, une amélioration de la structure interne, de la qualité de peau et des cotes du profil. Les passes refouleuses, sans glissement des galets, évitent l'apparition de replis de laminage ou le masquage des défauts provenant de l'aciérie.

Le rythme de la pose des rails d'une double voie en alignement peut atteindre 50 m à 60 m par jour, environ la moitié pour les sections courbes, la stabilisation étant d'environ 24 heures pour du béton à prise rapide.

Les rails courbes sont précintrés à la courbure voulue avant d'être mis en place.

Pour limiter les phénomènes de crissement et d'usure dans les courbes de faible rayon, inférieur à 50 m, on dépose un cordon de soudure sur la table de roulement (anti-crisissement) et sur le flanc de la gorge du rail (anti-usure).

9.3 Tracé des voies

Afin d'assurer aux tramways une vitesse commerciale élevée, on s'efforce d'adopter des standards de profil en long et en travers compatibles avec le confort et les performances recherchées :

- rayon minimal : 25 m ;
- dévers maximaux : 160 mm ;
- rayon minimal en bosse (pont) : 700 m à 1 000 m ;
- rayon minimal en creux : 350 m ;
- rampe maximale : 60 %.

Des valeurs plus élevées de rampe existent cependant à Strasbourg (80 %), Bâle (77 %) et surtout à Lisbonne (140 %).

L'établissement des courbes nécessite des précautions particulières afin de ne pas diminuer le confort des voyageurs debout et limiter l'inclinaison des rames et la poussée des roues sur les rails.

La variation progressive de la courbure entre une ligne droite et l'arc de cercle correspondant au rayon minimal de la section courbe est la clochoidé, pour laquelle le rayon de courbure est inversement proportionnel à la longueur de l'arc.

Lorsque les voies courbes sont établies dans la chaussée, le plan de la voie reste horizontal.

Lorsque les voies sont en site propre, on incline progressivement le plan de roulement vers l'intérieur de la courbe, afin de compenser l'effet de la force centrifuge sur les voyageurs et sur le matériel. Le dévers est alors la dénivellation, mesurée en millimètres, entre les axes des deux rails.

Dans la pratique, le dévers pour les voies de tramway ne dépasse généralement pas 160 mm en pleine voie et 70 mm en station courbe.

La mise en dévers s'effectue progressivement sur toute la longueur de la clochoidé puis conserve une valeur constante dans le tracé courbe circulaire.

Durant la mise en dévers, les deux files de rail, en profil en long, forment un angle constant dont la tangente est appelée gauche de la voie ; dans la pratique, pour tenir compte du comportement des roues et de l'inclinaison entre la caisse et les bogies, on limite le gauche à 4 mm/m.

Pour l'établissement du tracé définitif des voies et l'implantation des stations, on prend en compte les caractéristiques dimensionnelles du matériel et notamment des gabarits.

Le **gabarit statique** est la courbe enveloppe, dans le plan transversal, du tramway à l'arrêt sur une section de voie horizontale.

Le **gabarit dynamique** est l'enveloppe des positions extrêmes occupées par le tramway en marche en intégrant :

- les oscillations dues à la suspension ;
- les efforts latéraux renvoyés par les rails lors des passages en courbe ;
- les usures diverses.

Les axes de deux voies parallèles tiennent compte du gabarit dynamique des rames, ce qui donne, dans la pratique, une lame d'air de 15 cm entre deux rames qui se croisent contre 30 cm à l'arrêt. On prévoit, par ailleurs, une lame d'air de 15 cm entre le gabarit dynamique du tramway et les obstacles fixes (signaux, poteaux de ligne, muret, etc.) : c'est le gabarit limite des obstacles (GLO).

Le tracé de deux voies courbes parallèles doit tenir en compte des dimensions du futur matériel roulant, notamment les porte-à-faux extrêmes qui génèrent la corne, côté extérieur, et le ventre, côté intérieur, par rapport à l'axe de la voie. La corne et le ventre obligent à surélever les voies en courbe pour que les rames puissent se croiser en toute sécurité.

Exemple : pour les tramways au gabarit statique de 2,30 m ou de 2,40 m, l'entraxe des voies est de :

- 2,70 m en alignement ;
- 2,90 m en courbe pour $R < 100$ m.

9.4 Appareils de voie

Tout réseau nécessite l'existence d'un certain nombre d'appareils de voie, généralement encastrés dans la chaussée, constitués à partir d'éléments de rails utilisés par ailleurs. On distingue :

- les joints de dilatation que l'on pose de part et d'autre des ponts ;
- les traversées permettant le croisement de deux voies : suivant l'angle de la traversée, les bogies franchissent les coûts de croisement sur leurs bandages (angles faibles) ou sur leurs boudins qui roulent alors sur fond d'ornière (angles se rapprochant de la perpendiculaire) ;
- les aiguillages permettant la séparation de deux itinéraires (prise en pointe) ou la jonction de ceux-ci (prise en talon).

Les aiguillages pris en pointe sont commandés à l'aide d'un moteur électro-hydraulique qui manœuvre les lames d'aiguille suivant la nature de l'ordre reçu depuis une boucle électromagnétique disposée entre les rails qui reçoit les signaux émis par un émetteur situé sous la cabine de conduite ; ces signaux sont générés manuellement, par l'appui sur un bouton poussoir par le conducteur, ou automatiquement en fonction de la ligne ou de la destination affichées sur la girouette de la rame.

Un signal lumineux indique au conducteur l'état de l'aiguillage et la sécurité de passage est assurée par un circuit de voie pour éviter que l'appareil change d'état pendant le passage de la rame.

On prévoit en outre, environ tous les 2 km, une communication, formée de deux aiguillages, permettant de changer de voie par rebroussement en cas d'interception de la ligne par un événement imprévu (accident, manifestation, etc.). Ces aiguillages, rarement utilisés, sont généralement actionnés manuellement à l'aide du sabre d'aiguillage qui est rangé dans la cabine de conduite.

Les angles de déviation usuels sont de $\tan 1/4$, $\tan 1/2,18$ ou $1/6$.

On distingue deux sortes d'aiguillages pouvant être pris en talon, c'est-à-dire dans le sens de la jonction de deux voies :

- aiguillage talonnable renversable : les roues poussent les lames d'aiguille dans la position de passage de la rame ; on trouve de tels appareils dans les dépôts, à la sortie du remisage par exemple où les mouvements se font en sens unique ;
- aiguillage talonnable non renversable : les lames d'aiguille sont maintenues dans une position préférentielle donnée par un ressort : à chaque passage de roue, les lames d'aiguille se placent

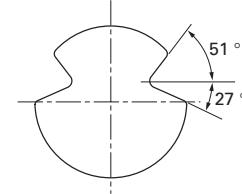


Figure 7 – Coupe d'un fil de contact

dans le sens de passage des roues et reviennent aussitôt dans leur position d'origine ; cette technique est utilisée dans les communications fréquemment utilisées (terminus partiels) ou, en voie unique, sur les aiguillages encadrant un évitement pour obliger les rames à utiliser systématiquement une voie donnée dans un sens, la deuxième voie dans le sens inverse.

Dans certains cas, certains aiguillages ne sont pas talonnables et l'itinéraire correct ne peut être effectué qu'après la télécommande de l'appareil dans la position voulue.

À l'intérieur des dépôts, il est usuel de confier au PCC le soin d'établir les itinéraires, facilitant ainsi la tâche du conducteur qui fait avancer sa rame jusqu'à son lieu de stationnement final.

10. Ligne aérienne

La **ligne aérienne de contact** est faite en cuivre électrolytique tréfilé qui a un profil très spécial comprenant, notamment, dans sa partie supérieure, un talon destiné à être pris dans la pince de suspension. La section de cuivre (figure 7) varie généralement de 107 mm^2 à 150 mm^2 selon la fréquence de passage et la puissance des rames circulant en ligne. On a naturellement intérêt, pour des raisons économiques, à opter pour un type de fil unique.

La ligne de contact est maintenue dans l'air à une hauteur légale de 6 m par temps chaud.

Selon les possibilités locales, les pinces de suspension sont fixées à des **câbles transversaux**, perpendiculaires à la ligne de contact et qui peuvent être ancrés soit aux façades des immeubles, par scellement chimique, soit à des poteaux plantés sur les trottoirs, ces poteaux pouvant servir de supports pour l'éclairage public.

Dans les cas où les immeubles ne se prêtent pas pour recevoir des ancrages en façade, on peut planter des poteaux, munis de consoles, le long d'un côté seulement de la voie.

La ligne aérienne est montée en zig-zag avec un angle d'environ 2° à chaque point de suspension de manière que l'archet en carbone ou **pantographe** soit usé régulièrement sur toute sa surface.

Pour amortir les oscillations, le contact entre la pince de suspension et le fil de contact n'est pas direct mais on assouplit la suspension par un delta (figure 8) dont la longueur est fonction des vitesses pratiquées et de l'importance des portées. On obtient ainsi une meilleure longévité du fil de contact.

Dans les villes, la ligne aérienne est généralement autocompensée et se doit d'être tendue à environ 1 200 kg pour une température ambiante de 20°C . La distance moyenne entre deux portées n'excède pas 30 m.

Sur les sections rectilignes extérieures, on peut appliquer la technique de la ligne aérienne régularisée par des contrepoids ; dans ce cas, la distance moyenne entre deux portées peut atteindre 60 m et la réduction du nombre de poteaux entraîne des économies substantielles.

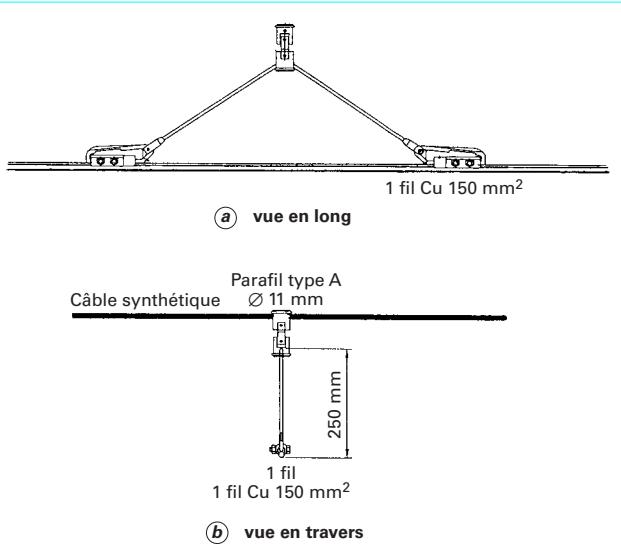


Figure 8 – Delta de suspension (Strasbourg)

La suspension caténaire offre peu d'intérêt pour les tramways vu les vitesses pratiquées qui ne dépassent pas les 80 km/h.

Les câbles transversaux en acier galvanisé ont progressivement cédé la place à des cordes synthétiques en Parafil ou en Kevlar qui ont l'avantage d'être très légères et de ne subir aucune corrosion. Leur mise en œuvre, en outre, est facile et rapide. Elles absorbent les vibrations et protègent les immeubles.

11. Alimentation en énergie

Les tramways urbains sont toujours alimentés en courant continu (cc) car cela crée peu de parasites sur les autres circuits électriques ou radioélectriques dans les rues.

La tension d'alimentation est passée progressivement de 500 V à 750 V, valeur unifiée par la Commission électrotechnique internationale, 750 V étant un quart de 3 000 V.

Afin de diminuer les chutes de tension en ligne et de garantir une sécurité optimale d'exploitation, on s'efforce de disposer les sous-stations le plus près de la ligne à des intervalles moyens de 2 km à 2,5 km environ.

La puissance disponible est, suivant les constructeurs, de 900 kW à 1 200 kW.

Sur certaines sections suburbaines, en Suisse, en Italie et en Grande-Bretagne notamment, on élève la tension à 1 200 V ou 1 500 V afin de pouvoir augmenter les intervalles entre sous-stations.

Lorsque les sections interurbaines sont très longues (Karlsruhe), il est alors plus intéressant d'électrifier en courant monophasé haute tension (15 kV ou 25 kV), ce qui nécessite naturellement un appaillage conséquent à bord du matériel roulant mais permet des installations électriques simples et légères au sol ; c'est ce qui avait déjà prévalu lors de l'électrification du Chemin de fer du Montenvers (1954) et du Tramway du Mont-Blanc (1957) en 11 kV 50 Hz.

Une sous-station de traction classique comprend essentiellement (figure 9) :

- un poste de livraison alimenté en dérivation par le réseau HT local (10 kV à 20 kV) ;

- des cellules de protection et de comptage ;
- un transformateur principal de 20 kV/585 V d'une puissance de 1 000 kVA ;
- un groupe redresseur au silicium de 900 kW, débitant 1 200 A sous 750 V ;
- deux disjoncteurs ultrarapides à courant continu reliés à quatre départs 750 V, deux pour la ligne aérienne, deux pour le feeder ;
- un transformateur 20 V/380 V pour l'alimentation des auxiliaires ;
- une source 220 V secourue pour l'alimentation des équipements en station ;
- une source 48 V secourue pour l'alimentation des auxiliaires de commande et de contrôle.

La ligne aérienne est divisée en secteurs électriques délimités par les sous-stations, chaque sous-station alimentant les deux secteurs voisins. Les limites des secteurs sont matérialisées par un isolateur de section inséré dans la ligne aérienne.

Chaque secteur est protégé par des disjoncteurs ultra-rapides à courant continu avec détecteur de défaut de ligne (DDL) et dispositif d'essai de ligne (EDL) associés. Le rôle du DDL est d'analyser la forme et la valeur de l'augmentation du courant dans la ligne tout en discriminant la charge produite par le trafic normal de celle produite par un défaut.

Les EDL vérifient l'absence de défaut sur la ligne avant d'autoriser la fermeture des disjoncteurs ultra-rapides.

Les secteurs sont divisés en sous-secteurs reliés entre eux par des interconnexions automatiques dont le rôle est de ponter les isolateurs de section en cas d'avarie dans une sous-station.

Dans certains réseaux on trouve des sous-stations équipées de bancs de résistances, régulées par un hacheur, permettant d'absorber l'énergie fournie par un tramway freinant par récupération.

Les sous-stations sont gérées par un automate programmable mais sont télésurveillées depuis un PCC Énergie qui dispose également d'une télécommande informatisée permettant d'opérer, à distance, toutes les manœuvres nécessaires.

12. Matériel Roulant

12.1 Évolution technologique

12.1.1 Partie mécanique

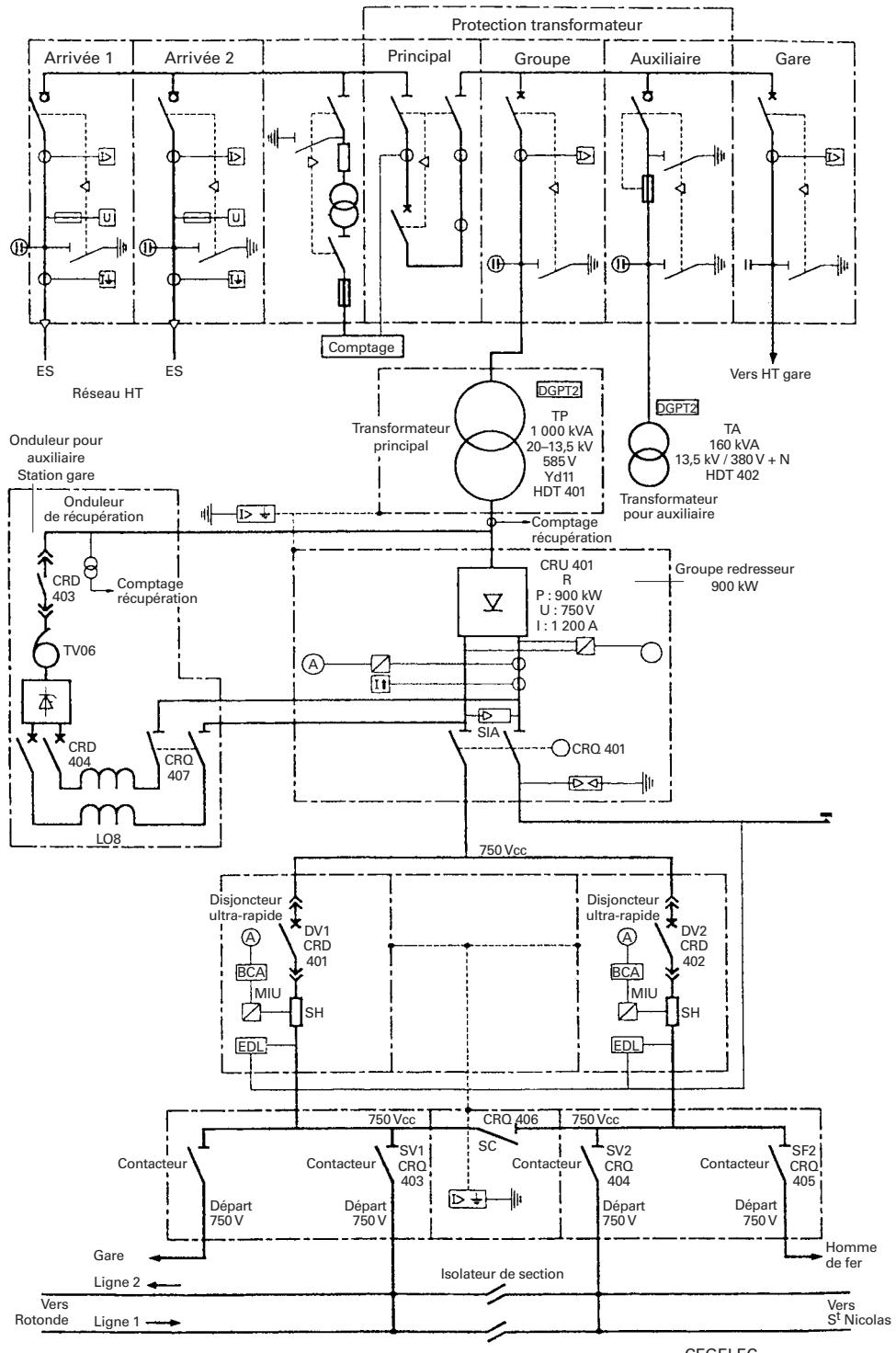
Jusque vers 1930, les tramways ont une caisse en bois, tôleée extérieurement, héritée de la traction hippomobile.

À partir de 1935 apparaissent les légendaires motrices PCC dont la construction se démarque radicalement des réalisations antérieures : remplacement des ressorts à lames par des éléments en caoutchouc, roues élastiques, moteurs longitudinaux avec transmission par cardans et engrenages hypoïdes, freins mécaniques sur la transmission et des formes aérodynamiques très plaisantes.

Les premiers tramways européens vraiment modernes apparaissent en 1940 en Suisse où l'industrie produit une motrice standard qui est livrée à Zurich (117 exemplaires), Bâle (76), Berne (25) et Genève (30), avec remorques appareillées. Les équipements électriques sont à contacteurs électropneumatiques ou électromagnétiques.

En Allemagne, les premiers tramways modernes à grande capacité apparaissent en 1951 à Hanovre et à Düsseldorf avant de se généraliser dans la plupart des villes de l'Ouest (figure 10).

Le constructeur allemand DÜWAG, de Düsseldorf, a mis au point en 1952 un bogie monomoteur où un moteur de traction unique entraîne les deux essieux. En 1956 apparaissent les premières



Cette figure est donnée à titre indicatif. Pour mieux la comprendre, le lecteur pourra se reporter aux articles sur les Transports électriques urbains du traité Génie électrique

Figure 9 – Schéma unifilaire général d'une sous-station à Strasbourg (CEGELEC)



Figure 10 – Tramway standard Düwag/Siemens pour les réseaux d'Allemagne de l'Ouest (Krefeld)

rames articulées à deux caisses (20 m) puis à trois caisses (26 m) permettant de transporter un nombre de plus en plus élevé de voyageurs avec un seul agent à bord.

À Genève, un tramway articulé révolutionnaire, imaginé par Vevey (aujourd'hui Groupe Bombardier) est mis en service en 1984. Si les bogies monomoteurs (Düwag/BBC) sont traditionnels, avec des roues de 660 mm de diamètre, le bogie porteur Vevey, issu des trucks porteurs pour les chemins de fer à voie métrique, est muni de petites roues de 440 mm de diamètre ce qui permet d'abaisser le niveau du plancher à 480 mm sur environ 70 % de la longueur du véhicule. Une marche intermédiaire est encore nécessaire à chaque entrée mais la voie future est tracée.

À Grenoble, les élus et les techniciens du Syndicat mixte des transports en commun sont convaincus que le matériel roulant du futur doit être à plancher bas. À part du véhicule de Nantes, Alstom présente alors un projet où, en dehors des bogies moteurs extrêmes, le plancher est rabaisé à 350 mm avec roues neuves. Un nouveau bogie porteur est étudié où les essieux traditionnels sont remplacés par de faux essieux fixes, surbaissés, les quatre roues devenant indépendantes ; le plancher bas peut ainsi passer dans les articulations qui sont constituées d'un double mais court module d'intercirculation, reposant sur le bogie porteur, aux extrémités duquel s'appuient et s'articulent les caisses motrices (figure 11).

À Strasbourg, on s'informe beaucoup et on se déplace en 1990 à Brême pour voir un prototype de tramway à trois caisses réalisé par MAN, chacune reposant sur un bogie à quatre roues indépendantes dont deux d'entre elles, parallèles, sont entraînées au moyen d'un réducteur de cardans et de renvois d'angles par un moteur de traction logé dans le lit de caisse. Hormis les podiums qui recouvrent les moteurs de traction et quelques auxiliaires, le plancher bas est présent sur toute la largeur de la rame. Les ingénieurs de la CTS, de la Communauté urbaine, travaillent sur un projet original d'un matériel roulant, celui de l'**Eurotram**, constitué de courts modules d'intercirculation, reposant sur un bogie moteur, aux extrémités desquels sont articulés de grands compartiments voyageurs. L'intérêt de cette conception est que le modèle est modulaire et que l'on peut concevoir des longueurs de 23 m, 33 m, 43 m et davantage si nécessaire.

La construction des vingt-six premières rames est réalisée par ABB (aujourd'hui ADtranz) dans son usine d'York. Les rames sont équipées de l'air conditionné et les moteurs de traction de 24,5 kW sont triphasés, asynchrones, refroidis par eau et alimentés, par



Figure 11 – Tramway type Grenoble sur la ligne du Val-de-Seine (RATP)

groupes de deux, par un onduleur de 104 kVA alimenté en 750 V cc et distribuant une tension alternative triphasée de 585 V. Les moteurs sont entièrement fermés et sont insensibles aux projections d'eau ou de neige. Le freinage est par récupération jusqu'à 8 km/h environ puis complété par un frein direct électrohydraulique à disques (SAB WABCO) agissant jusqu'à l'arrêt. En cas d'urgence, le freinage est complété par l'action de patins électromagnétiques (deux par bogie), conférant une décélération moyenne de 3 m/s² de 60 km/h à 0 km/h. La conception des caisses, réalisées en aluminium soudé, est aussi originale. L'extérieur des rames est entièrement habillé d'éléments en polyester qui, outre leur fonction esthétique, protègent les châssis contre les chocs en cas de collision avec un véhicule routier ; fixés au moyen de bande Velcro sur le châssis, ces éléments sont aisément interchangeables en atelier et le temps d'immobilisation est ainsi très court.

12.1.2 Équipements électriques

Jusque vers 1925, les tramways étaient pourvus de deux, éventuellement quatre, moteurs de traction à courant continu, suspendus par le nez et alimentés en 500 V cc à 600 V cc au moyen d'un contrôleur direct.

Celui-ci était constitué d'un cylindre vertical portant des segments en cuivre reliés électriquement à des résistances en fonte. La manœuvre du contrôleur par le conducteur plaçait, cran par cran, des résistances en série avec les moteurs ; à chaque cran, la valeur ohmique diminuait et les moteurs tournaient plus vite jusqu'à ce qu'ils soient alimentés sous la pleine tension de la ligne.

En 1936, la motrice PCC américaine apparaît avec ses nombreuses innovations techniques.

Westinghouse, en particulier, produit un accélérateur à tambour (figure 12) à l'intérieur duquel pivote un arbre portant un bras supportant un galet circulant sur soixante-cinq plots reliés aux résistances de démarrage ; le bras est entraîné par un servomoteur asservi à la position de la pédale de traction qui impose le niveau d'accélération.

Après la deuxième guerre mondiale, les principaux constructeurs électriques européens mettent au point des équipements de traction où la graduation se fait à l'aide de contacteurs électromagnétiques ou électropneumatiques, selon le savoir-faire, qui shuntent progressivement le rhéostat.

Au début des années 1960, divers constructeurs européens mettent au point des électroniques de commande qui contrôlent l'accélération, le freinage, l'antipatinage, l'antienrayage et permettent de

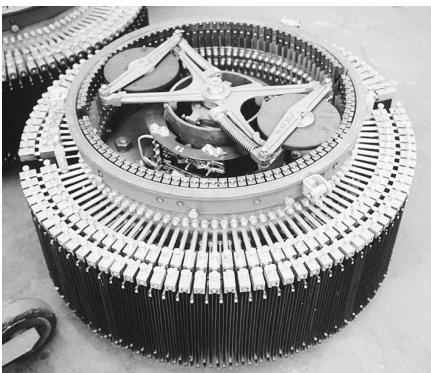


Figure 12 – Accélérateur rotatif Westinghouse de la plupart des motrices PCC

maintenir une vitesse constante quel que soit le profil de la ligne et la charge du véhicule.

En 1973 apparaît à Graz le premier tramway muni d'un hacheur de courant Siemens ; c'est l'électronique de puissance qui, assistée de l'électronique de commande, permet des démarrages et des freinages en souplesse et surtout sans pertes ohmiques dans un rhéostat devenu inutile puisqu'on se sert de thyristors à la manière d'un interrupteur qui est ouvert et fermé alternativement pour alimenter les moteurs en énergie de traction. Pour faire varier la tension, on joue sur le temps de conduction des thyristors, la fréquence des impulsions envoyées étant généralement constante.

Malgré les avantages du hacheur, qui permet d'économiser jusqu'à 20 % d'énergie au démarrage et de diminuer les heures de maintenance, on reste tributaire des inconvénients des moteurs classiques à courant continu avec collecteur.

En 1977, le métro de Helsinki reçoit des rames équipées de moteurs triphasés asynchrones, à cage, sans collecteur, ce qui permet de rouler dans la neige poudreuse sans risque de dommage. L'année suivante le constructeur Strömborg équipe de la même manière un premier trolleybus pour la ville suisse de Winterthur.

Cette nouvelle technologie ne va s'imposer progressivement qu'au début des années 1990 car beaucoup d'industriels cherchent à mettre au point les convertisseurs statiques continu-triphasés.

On constate d'ailleurs l'existence de deux écoles :

- le moteur triphasé asynchrone, de construction simple, d'un volume et d'un poids réduits, mais exigeant une électronique de commande et de puissance complexes ;

- le moteur triphasé synchrone, autopiloté, à aimant permanent, plus volumineux et plus lourd, à puissance égale, que le moteur asynchrone, ce qui limitera son application à des locomotives de ligne.

C'est donc la **traction asynchrone** que l'on retrouve, à présent, dans tous les nouveaux tramways avec quatre techniques de motorisation :

- un moteur unique par bogie entraînant mécaniquement les deux essieux ;

- deux moteurs par bogie, disposés en long à l'extérieur du cadre et entraînant deux roues indépendantes d'une même file de rail (Combino de Siemens) ;

- quatre moteurs entraînant chacun une roue indépendante au moyen d'un réducteur (Eurotram d'ADtranz) ;

- quatre moteurs par bogie, chacun flasqué sur une roue, sans réducteur intermédiaire, la carcasse du rotor étant fixée directement sur la roue (Variotram d'ADtranz).

Dans l'**Eurotram** de Strasbourg, on trouve la troisième solution : chaque bogie est doté de quatre moteurs asynchrones de 26 kW,

refroidis par eau pour réduire leur volume. Les moteurs sont alimentés, deux par deux, pour une même file de rails, par un onduleur transistorisé à trois points, de 104 kVA, refroidi par eau, sous une tension alternative atteignant 585 V.

Cette technologie a été préférée à celle utilisant des thyristors éteignibles par la gâchette (GTO) en raison de leur temps de commutation plus réduit et d'une commande moins complexe pour ce niveau de puissance.

Plus récemment, de nouveaux semi-conducteurs de puissance sont apparus, à savoir les IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistors*) qui sont le cœur des nouveaux onduleurs alimentant les moteurs de traction ; beaucoup plus compacts que les convertisseurs GTO, les IGBT s'intègrent dans des schémas électriques plus simples et facilement modulaires en fonction des tensions et des courants de sortie. Pratiquement, tous les onduleurs de traction produits à l'aube du 21^e siècle utilisent la technologie IGBT.

La logique à relais, qui gérait les différents mouvements séquentiels embarqués, tels que les tests initiaux, l'interface entre le manipulateur et l'accélération ou la décélération, la gestion des équipements embarqués, a fait place à une logique programmée permettant de modifier instantanément de nombreux paramètres à l'aide d'une valise-test.

Ces logiques programmées sont modulaires et ont une capacité de traitement très élevée grâce à l'emploi généralisé de microprocesseurs ; les différentes unités sont reliées entre elles par un réseau informatique permettant de dialoguer avec les modules d'entrées/sorties déportés. On trouve généralement, sur la rame, une logique « esclave » fonctionnant en redondance passive.

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

La logique de contrôle vérifie, avec un algorithme adapté, que les différences de vitesse entre les roues se maintiennent dans une limite étroite. Une dérive de cette limite traduit le début d'un patinage ou d'un enrayage, phénomène susceptible de provoquer des méplats sur les bandages des roues ; en conséquence, le contrôle réduit l'effort de traction ou de freinage à la roue de façon à retrouver l'adhérence souhaitée.

Un **système de diagnostic embarqué** effectue les activités suivantes :

- diagnostic des défauts de premier degré (porte ouverte, frein bloqué, moteur hors tension, etc.) ;
- mémorisation des données dans une mémoire rémanente ;
- guide opérateur de dépannage.

Le système communique et dialogue avec le conducteur à l'aide d'une console disposée sur le pupitre de conduite. Le programme est construit sur les bases d'un système expert et se subdivise ainsi :

- saisie des données ;
- identification du défaut ;
- mémorisation dans la mémoire rémanente ;
- communication avec le conducteur.

L'affichage sur la console fournit les informations exactes pour appliquer, en langage clair, les mesures à prendre pour continuer la marche.

Les événements des derniers kilomètres et les défauts enregistrés sur mémoire rémanente peuvent, au dépôt, être transmis de manière détaillée sur une imprimante et sur une table traçante.

L'ensemble du tramway est parcouru par une boucle câblée de sécurité, dotée d'une alimentation flottante double pour garantir une bonne fiabilité.

Cette boucle comporte, en série, des contacts reliés à des éléments concourant à la sécurité durant la marche.

Le dysfonctionnement d'un organe de sécurité (défaut de la veille automatique, ouverture inopinée d'une porte) provoque l'ouverture du contact correspondant sur la boucle de sécurité et l'action du frein d'urgence.

Les circuits des auxiliaires (éclairage, timbre, sonorisation, patins électromagnétiques, etc.) sont généralement alimentés en 24 V cc à partir de la batterie de bord, elle-même rechargeée par le convertisseur statique qui peut distribuer également d'autres tensions telles que du 440 V 50 Hz pour l'air conditionné, les compresseurs, etc. et du 250 V 50 Hz pour les circuits de refroidissement des moteurs de traction et des onduleurs.

12.2 Conduite

Depuis la renaissance du tramway en France, en 1985, des efforts louables ont été apportés à l'aménagement des cabines de conduite, tant sur le plan de l'ergonomie que de la sécurité.

Dans l'Eurotram de Strasbourg, la priorité a été apportée à une visibilité exceptionnelle pour le conducteur sur son environnement. Ces tramways sont en effet pourvus du plus grand pare-brise jamais réalisé pour un véhicule de transport public.

Pour concentrer son attention à la conduite, le conducteur n'a sous les yeux qu'un nombre très limité d'instruments : le tachymètre, les écrans de rétrovision, les deux boutons de télécommande des aiguillages et l'écran de diagnostic.

Hors de sa vision directe se trouvent :

- à droite, la console SAE qui renseigne sur son avance/retard et lui communique des messages du PCC, le départ sur ordre (DSO), le radiotéléphone ;
- à gauche, et dans un ordre hiérarchique parfaitement étudié, le commutateur de marche à quatre crans (0, Préparation de la rame, Manœuvre, Marche) et tous les boutons-poussoirs nécessaires : éclairage, warning, marche arrière, dépréparation de la rame, etc., ainsi que quelques boutons-poussoirs plombés à n'utiliser qu'avec l'accord du PCC : inhibition de la boucle de sécurité, isolement d'un frein mécanique, etc.

Les commandes nécessaires à la conduite sont regroupées dans les accoudoirs du fauteuil :

— à gauche, le manipulateur de traction-freinage qui, suivant sa position, impose le niveau d'accélération (en avant) ou de décélération (en arrière) avec un cran neutre (marche sur l'erre) et un cran pour le freinage d'urgence ;

— à droite, tous les boutons-poussoirs nécessaires au service des portes, à la commande des sablières, aux appels de phares, etc.

Quelques raffinements, uniques à l'Eurotram de Strasbourg :

— le conducteur peut régler la hauteur et l'inclinaison du plancher pour offrir à ses jambes un appui idéal ;

— les rétroviseurs traditionnels sont remplacés par des caméras de rétrovision renvoyant sur deux écrans des images parfaitement nettes, surtout la nuit. Jamais un véhicule de transport public n'a fait l'objet de tant d'imagination, ce qu'attestent les visiteurs qui viennent des cinq continents ;

— le conducteur, une fois les portes fermées, n'a qu'un seul geste à faire de la main gauche : pousser son manipulateur pour gagner de la vitesse, le ramener pour freiner, actionnant éventuellement le timbre qui distingue un tramway du reste des usagers de la rue, et surtout, à intervalles réguliers, le petit bouton de la veille automatique qui contrôle l'état physique du conducteur et déclenche le frein d'urgence en cas de défaillance du maître à bord.

13. Tramways en tout genre

La notion de tramway moderne n'a pas d'autre définition que celle de plaisir à ses utilisateurs fiers et satisfaits de l'emprunter...

En France les tramways ont dès leur origine porté l'obsolescence en eux excepté les motrices de l'Électrique Lille – Roubaix – Tourcoing qui se démarquaient, en 1938 et en 1950, de tout ce qui se connaissait dans l'Hexagone.

En dehors des progrès technologiques, notamment au niveau des équipements de traction, l'innovation la plus marquante des années 1980 a été l'apparition des tramways à plancher bas.

Cette notion n'est pas si nouvelle que cela, puisque l'histoire nous rappelle que les vingt motrices électriques de la première ligne du tramway souterrain de Budapest (1896) étaient à plancher surbaissé (500 mm) entre les bogies moteurs et que en 1912, sous la pression d'organisations féminines locales qui se plaignaient de devoir relever leurs longues robes pour escalader les marchepieds des tramways, le maire de New York a fait construire cent soixante-seize motrices à bogies dont la très large plateforme centrale est surbaissée à 210 mm au-dessus du niveau de la chaussée.

L'apparition, en 1984, à Genève, des premiers tramways où, entre les bogies moteurs, le niveau du plancher s'abaisse de 870 mm à 480 mm démontre que l'accès à ce type de véhicule peut être nettement amélioré.

À Grenoble, les associations de personnes handicapées pressent les élus d'installer un tramway qui leur serait directement accessible. Après plus d'une année d'études, un groupe de travail et le constructeur Alstom présentent les grandes lignes d'une rame articulée dont le plancher bas est à 350 mm sur 70 % de la longueur de la rame ; toutes les portes sont au niveau bas et les fauteuils roulants peuvent accéder au tramway grâce à une petite palette, rétractable, jouant le rôle de passerelle entre le plancher et le quai de station.

Désormais, le mouvement est lancé et les tramways à plancher bas vont progressivement s'imposer.

Pourtant, les nouveaux tramways sont loin de se ressembler et font appel à des principes variés.

13.1 Tramways conventionnels rallongés avec section surbaissée réduite

Il s'agit de tramways articulés classiques, à plancher horizontal (à 900 mm), construits dans les années 1980 et 1990 ayant une durée de vie suffisamment longue pour justifier leur transformation en leur insérant une caisse intermédiaire dont le plancher est surbaissé.

Pour conserver les performances d'origine et donc réduire le poids, il a été récemment fait appel à la réalisation de caisses en matériaux composites (polyester) comme à Cottbus et à Bâle selon les procédés développés par Schindler (CH).

Le tableau A en [Form. C 4 440] donne les caractéristiques de ces tramways.

13.2 Tramways conventionnels avec section surbaissée d'origine

Il s'agit de tramways de la même catégorie que précédemment mais dont une partie de la section à plancher surbaissé a été intégrée dès l'origine (figure 13).

Si les exemplaires d'Amsterdam, Würzburg et Fribourg-en-Brisgau I sont classiques avec caisse centrale à plancher bas, les exemplaires de Sheffield, Fribourg II et Sarrebruck sont très diffé-



Figure 13 – Nouveau tramway de Kassel (Bombardier, 1999)

rents puisque tous les bogies sont motorisés, en raison des fortes rampes, et la moitié des bogies moteurs est disposée sous la caisse centrale, les sections à plancher surbaissé se limitant à une sorte de havre de tranquillité pour les voyageurs faisant un long trajet.

Le tableau **B** en [Form. C 4 440] donne les caractéristiques de ces tramways.

13.3 Tramways à plancher bas partiel de 2^e génération

Il s'agit de matériels dont la partie surbaissée est prédominante (70 % de la longueur totale) mais où l'utilisation de bogies moteurs de conception classique, à la demande des exploitants, situés aux extrémités de la rame, rend nécessaire la présence de zones surélevées situées au droit de la motorisation.

On peut distinguer trois familles de tramways :

- les tramways munis de bogies porteurs à petites roues ;
- les tramways munis de roues ou d'essieux orientables ;
- les tramways issus de l'école grenobloise.

13.3.1 Tramways munis de bogies porteurs à petites roues

Vevey Technologies (groupe Bombardier) a eu l'idée d'adapter ses trucks porteurs, à petites roues, pour le transport des wagons à voie normale sur la voie métrique, afin d'abaisser la hauteur du plancher. Cette technique a été reprise pour certaines réalisations en Allemagne.

Exemple : le tramway Alstom LHB de Magdebourg (figure 14) est doté de bogies monomoteurs que l'on retrouve dans la gamme Citadis à plancher mixte.

Le tableau **C** en [Form. C 4 440] donne les caractéristiques de ces tramways.

13.3.2 Tramways munis de roues ou d'essieux orientables

Il s'agit de tramways articulés à trois caisses dont la caisse médiane repose sur deux « bogies à un essieu » qui s'orientent dans les courbes suivant la valeur du rayon afin d'éviter les frictions et le bruit.

Exemple : la caisse centrale du tramway de Heidelberg (figure 15) repose sur des roues orientables.



Figure 14 – Tramway Alstom LHB de Magdebourg



Figure 15 – Tramway de Heidelberg

L'origine de cette technique est due au professeur Friedrich, de l'Université d'Aix-la-Chapelle, qui a imaginé à la fin des années 1980 la technique des « trains de roues indépendantes autorégulées » en remplaçant les bogies à quatre roues par un train de deux roues indépendantes, motorisées ou non, disposées autour d'un axe vertical situé à l'extérieur d'une ligne joignant les points de contact des roues avec les rails et pouvant pivoter autour de cet axe ; les deux roues indépendantes sont reliées par une barre d'écartement surbaissée, le parallélisme entre les roues et les rails étant maintenu en alignement et en courbe.

Trois rames prototypes ont été construites en 1989 mais leur comportement a été très décevant : bruit dans les courbes, usure rapide des boudins des roues motrices, déraillements sur certains aiguillages, etc.

Le constructeur Düwag n'a pas insisté dans cette voie mais a poursuivi le perfectionnement du système du train de deux roues indépendantes, auto-orientables faisant office de bogie porteur.

L'idée est de s'affranchir des bogies porteurs pour simplifier les articulations entre caisses et d'abaisser les coûts d'acquisition. Les résultats en service sont satisfaisants mais le confort au-dessus des roues indépendantes orientables n'est pas comparable avec celui d'un véritable bogie à quatre roues.

Cette formule a trouvé une application nouvelle en introduisant une caisse en matériau composite entre les deux caisses motrices de rames articulées existantes.

Le tableau **D** en [Form. C 4 440] donne les caractéristiques de ces tramways.

13.3.3 Tramways issus de l'école grenobloise

À l'origine, le tramway de l'agglomération grenobloise est un compromis entre le tramway de Nantes (1985), à plancher haut, dont le constructeur voulait réutiliser certains composants éprouvés tels que les bogies moteurs et les équipements électriques de traction-freinage, et un schéma théorique où l'essentiel des compartiments voyageurs est surbaissé.

Le résultat est un diagramme de véhicule articulé composé de deux grandes caisses voyageurs à deux niveaux :

- la partie au-dessus du bogie moteur est à la cote de 875 mm ;
- la partie vers le centre de la rame, où sont les portes, est à la cote de 345 mm, la liaison entre les deux niveaux s'effectuant à l'aide de deux marches.

Ces deux caisses motrices s'articulent autour d'un module central d'intercirculation, lui-même composé de deux parties s'articulant autour d'un axe horizontal.

Les bogies monomoteurs sont dérivés d'un bogie porteur, à faux essieux surbaissés et à roues indépendantes, permettant le passage du plancher bas dans l'intercirculation d'où une proportion d'environ 66 % de plancher bas.

Le succès de ce diagramme a été considérable et a été copié de façon universelle, comme le montre le tableau **E** en [Form. C 4 440]. Au fil des ans, diverses modifications ont réduit le handicap des marches intérieures : roues motrices dépassant, dans des podiums, la hauteur du plancher permettant de réduire à une seule marche le passage d'un niveau à l'autre.

Beaucoup d'exploitants et de constructeurs ont, de plus, davantage de confiance en des bogies moteurs de conception classique plutôt que dans des transmissions nouvelles encore peu expérimentées.

Cette disposition rend, par contre, problématique la construction d'une porte frontale, nécessitant une à deux marches (service à 1 agent) ; étant donné que la majorité des réseaux de tramways modernes ont opté pour l'exploitation en libre service, avec distributeurs de titres sur les quais, cet inconvénient n'est généralement pas reconnu comme pénalisant. Seul le réseau de Boston maintient la montée obligatoire à l'avant (plancher à 890 mm), pour lutter contre la fraude, l'accès par le plancher bas médian (355 mm) étant réservé aux personnes handicapées.

Comme à Portland, on accoupe à Boston une rame à plancher bas partiel avec une rame à plancher haut pour respecter les exigences de la législation américaine pour l'accessibilité des handicapés dans les transports publics.

Certains réseaux, comme celui de Karlsruhe (figure 16), ont joué la modularité en allongeant ce type de matériel par insertion d'un module et d'un compartiment supplémentaires, la proportion de plancher bas pouvant atteindre 75 %.

Le tableau **E** en [Form. C 4 440] donne les caractéristiques de ces tramways.

13.4 Tramways à plancher bas partiel avec modules alternés

Il s'agit de tramways à cinq ou sept caisses dont les modules intermédiaires reposent sur un bogie porteur à roues indépendantes tandis que les modules d'extrémité sont montés sur des bogies



Figure 16 – Karlsruhe : rames surallongées de 39 m



Figure 17 – Tramway Citadis de Montpellier, premier tramway français au gabarit de 2,65 m

moteurs munis d'essieux de conception classique. De grands compartiments sont suspendus entre les modules.

Exemple : le tramway Citadis de Montpellier (figure 17) est le premier tramway français au gabarit de 2,65 m.

Cette famille de matériels a émergé en raison de la réticence de certains exploitants de voir arriver des bogies moteurs révolutionnaires démunis d'essieux. Cela permet également à certains constructeurs de rentabiliser la construction de bogies moteurs existants.

C'est dans ce schéma que s'inscrit la nouvelle gamme Citadis d'Alstom qui utilise un bogie moteur éprouvé, développé par sa filiale allemande LHB et qui équipe les tramways de Magdebourg et de Darmstadt.

Le bogie porteur est un développement nouveau composé d'un cadre articulé, formé de deux longerons reliés à deux faux essieux surbaissés, le rectangle obtenu étant articulé en deux points. Le nouveau bogie Arpège permet la continuité du plancher bas entre les bogies moteurs.

Il n'y a pas de suspension primaire, le rôle de cette dernière étant repris par la résilience élevée des roues élastiques.

Au droit des bogies moteurs, les roues motrices émergent partiellement dans le plancher à l'intérieur de podiums limitant ainsi la hauteur du plancher de cette zone à 600 mm, le plancher bas étant à 350 mm. La modularité permet de faire varier la longueur et la largeur selon les exigences du réseau.

La chaîne de traction, déjà installée sur les quinze rames grenobloises de 1995-97, est de la gamme ONIX avec moteurs asynchrones.

Les moteurs de traction asynchrones sont alimentés, en parallèle dans chaque bogie, par un onduleur IGBT avec une onde de tension modulée en longueur d'impulsions. L'électronique de commande règle l'amplitude et la fréquence de la tension triphasée équilibrée.

Un contrôle vectoriel autorise une montée du couple moteur extrêmement rapide avec un contrôle optimal du courant moteur ; ce contrôle vectoriel permet aussi de rétablir le couple, après un bref arrêt de l'onduleur, sans avoir à attendre le défluxage de la machine tournante grâce à l'ajustage de la tension de sortie de l'onduleur en fonction de la force électromotrice du moteur.

Le tableau **F** et le tableau **G** en [Form. C 4 440] donnent les caractéristiques de ces tramways.

13.5 Tramways à plancher bas intégral

13.5.1 Modèle de Brême

Dès 1987, date de l'apparition des tramways à plancher bas partiel, divers constructeurs, notamment en Allemagne et en Italie, ont estimé que le plancher bas partiel à 65-70 % n'était qu'une étape intermédiaire et qu'il fallait imaginer des tramways à plancher bas intégral seuls capables de permettre une modularité poussée, en longueur notamment, et d'avoir une grande liberté pour la disposition des portes.

C'est le réseau de Brême qui, le premier, a imaginé un tel véhicule avec MAN de Nuremberg et un prototype voit le jour en 1990. La rame est composée de trois caisses, chacune reposant en équilibre sur un bogie de configuration (1A)' composé d'une paire de roues indépendantes et de deux roues motrices reliées entre elles, de manière rigide en torsion, par des réducteurs à engrenages droits marchant parallèlement, et d'un arbre transversal surbaissé pourvu d'accouplements rigides en rotation.

L'un des réducteurs est relié par un arbre à cardans à un moteur de traction situé dans le plancher de la caisse et dissimulé sous des sièges. Les moments de gauchissement entre les deux roues motrices sont transmis par les réducteurs à engrenage droit et par l'arbre transversal rigide en torsion, lequel est fortement démultiplié vers les roues motrices.

Ce modèle de tramway a (figure 18) connu un grand succès en raison de son apparition en série sur le marché dès 1993 et ses bonnes qualités de roulement. Son adhérence partielle l'exclut cependant des réseaux à fortes déclivités.

Le tableau **H** en [Form. C 4 440] donne les caractéristiques de ces tramways.

13.5.2 Eurotram d'ADtranz

En redémarrant le projet en 1989, les élus et techniciens strasbourgeois sont convaincus que la formule du véhicule à plancher bas partiel est dépassée et inadaptée, en capacité, aux besoins de la capitale alsacienne.

L'idée se fige rapidement autour d'un concept nouveau d'un modèle de tramway où les équipements de traction-freinage sont concentrés dans de courts modules auxquels sont articulés de grands compartiments permettant tous les agencements possibles de disposition de portes et de sièges. Le principe de modularité prévoit des longueurs possibles, par adjonction de modules et compartiments, de 23 m, 33 m, 43 m, etc.

Les modules d'intercirculation sont considérés comme un passage d'un compartiment à l'autre et les sièges longitudinaux sont disposés au-dessus des roues. Chaque module repose sur un bogie fixe. Celui-ci est constitué d'un plateau sur lequel s'appuient, par l'intermédiaire de ressorts métal-caoutchouc, quatre bras compre-



Figure 18 – Modèle de Brême choisi par Berlin dans la version à trois caisses (ADtranz)

nant chacun un moteur de traction, un carter abritant le réducteur, la roue, le disque et l'étrier de frein.

Les moteurs de traction sont triphasés, asynchrones, refroidis par eau et sont pilotés, par deux et par file de rails, par un onduleur transistorisé.

La suspension secondaire des modules est à coussins pneumatiques.

La construction des châssis est réalisée en extrudés Alusuisse soudés, l'habillage intérieur et extérieur étant réalisé à l'aide de panneaux moulés en polyester fixés sur la structure à l'aide de bandes textiles Velcro, solution qui, en cas d'accident, permet de procéder rapidement au remplacement des panneaux avariés. Les articulations sont demi-sphériques.

Pour le confort, les tramways strasbourgeois sont non seulement équipés de l'air pulsé mais de l'air conditionné, pour le conducteur et les voyageurs.

Les versions pour Porto, Milan et Nottingham diffèrent sur le plan mécanique par une construction boulonnée des châssis, des panneautages en aluminium et par l'adoption de la technique IGBT pour les onduleurs de traction refroidis par eau.

Les Eurotrams de Strasbourg (figure 19) mesurent 33,10 m (36 unités) ou 43 m (17), ces derniers étant, à la fin du 20^e siècle, les plus longs tramways circulant au monde (Livre Guiness des records 2000).

Le tableau **I** en [Form. C 4 440] donne les caractéristiques de ces tramways.

13.5.3 Variotram d'ADtranz

L'Eurotram ayant été reconnu, dans l'état actuel de la technique, comme le tramway le plus évolué et le plus raffiné, son constructeur a dû se rendre à l'évidence que les nouveaux marchés qui s'ouvraient, en particulier dans l'Est de l'Europe, n'avaient pas les moyens financiers pour s'offrir la « Rolls Royce » des tramways.

Aussi, dès 1991, ABB étudie un tramway qui s'inspire de l'Eurotram sur ses principes de base mais qui s'en démarque par des principes constructifs plus simples et moins chers.

C'est le Variotram qui apparaît à Chemnitz en 1993 puis à Sydney en 1997 et enfin à Helsinki en 1999. Les principales différences portent sur les modules d'extrémité, qui sont surallongés de manière à permettre la disposition d'une double porte pour le service à un



Figure 19 – Eurotram de Strasbourg (Jumbotram) : le plus grand du monde



Figure 20 – Variotram du réseau OEG Mannheim – Heidelberg

agent, et sur les moteurs de traction triphasés asynchrones, refroidis par eau, directement flasqués sur les roues, sans réducteur intermédiaire.

La caisse est en acier soudé mais les panneaux de l'habillage extérieur sont en aluminium, facilement interchangeables.

Le Variotram est d'emblée conçu pour divers écartements de voie et le châssis des modules d'extrémité peut recevoir une cabine, en polyester, de style variable.

Une variante du Variotram a été développée par les cinq réseaux à voie métrique du triangle Rhin–Neckar : Heidelberg, Mannheim, Ludwigshafen (figure 20).

Dans ces véhicules qui, à la demande des autorités de tutelle, ne diffèrent que sur la longueur et le nombre de compartiments, afin de réduire les coûts d'acquisition, les modules d'extrémité reposent sur des bogies classiques à essieux et sont donc surélevés dans cette zone. L'initiateur de cette solution est le tramway interurbain OEG, circulant à vitesse élevée, qui a fait valoir que des modules avec cabines surélevées offraient une meilleure protection en cas de collision. L'entretien du matériel des cinq compagnies est regroupé à l'atelier central de Mannheim.

Le tableau J en [Form. C 4 440] donne les caractéristiques de ces tramways.

13.5.4 Tramways type Combino

Siemens a développé un nouveau modèle de tramway à plancher bas intégral, le Combino (figure 21), qui utilise aussi, de façon très poussée, le principe de la modularité.



Figure 21 – Combino adapté aux normes de Hiroshima (Hanning & Kahl)

Les deux éléments de base sont :

- un module monté sur un bogie, moteur ou non ;
- un compartiment voyageur muni d'une ou de deux portes doubles.

Les modules d'extrémité comportent, en plus, la cabine de conduite correspondante.

Grâce à la combinaison modules-compartiments, la longueur d'une rame varie de 19 m à 42 m et la largeur de 2,30 m à 2,65 m.

Les éléments de caisse comportent un lit de caisse sur lequel sont soudées les parois dont les montants et les profilés longitudinaux encadrant les fenêtres, en aluminium, sont boulonnés entre eux selon la technique « Alugrip » développée par Alusuisse et largement appliquée sur les trolleybus et autobus récents. L'avantage de cette technique est de faciliter les réparations de la structure.

La toiture est de construction sandwich comprenant deux plaques d'aluminium enserrant une couche de mousse à l'intérieur de laquelle est intégré le câblage.

Le bout avant, en polyester armé, est collé sur le châssis.

Le bogie est constitué d'un cadre à l'intérieur duquel sont montées quatre roues indépendantes. Dans la version motorisée, deux moteurs de traction asynchrones, disposés en long, entraînent les deux roues d'une même file de rails. Cette disposition permet de réaliser un bogie moteur et un bogie porteur identiques, la motorisation et les ponts réducteurs en moins.

La régulation se fait à l'aide d'onduleurs IGBT intégrant un hacheur pour le freinage électrique.

Le tableau K en [Doc. C 4 440] donne les caractéristiques de ce type de tramway.

13.5.5 Tramways nouveaux

De nouveaux modèles vont apparaître à l'aube du 21^e siècle. Ils ont la caractéristique d'être tous à plancher bas intégral et modulaires selon des principes variés :

ADtranz : l'**Incentro** (figure 22) représente une synthèse de l'Eurotram et du Variotram ; en construction pour Nantes.

ADtranz : la société bâloise Schindler a développé un tramway original pour Zurich. Chaque caisse repose sur des « bogies » à deux roues orientables (système SIG-FIAT). Chaque caisse motrice est dotée de deux moteurs de traction asynchrones, disposés longitudinalement sur le côté, avec transmission par cardan sur les deux roues de la même file de rail.



Figure 22 – Incentro choisi pour Nantes (ADtranz)

Alstom : le **Citadis** construit pour Lyon est un développement de la gamme Citadis 300 (tableau **F** en [Form. C 4 440]) où les bogies moteurs « Magdebourg » sont remplacés par des bogies « Arpège » motorisés. La continuité du plancher bas est ainsi possible de bout en bout de la rame.

Le bogie Arpège motorisé comprend deux moteurs de traction asynchrones, montés en quinconce, perpendiculairement à l'axe de la voie, un arbre de transmission entraînant, par l'intermédiaire d'un réducteur, les deux roues indépendantes qui se font face.

Le châssis du bogie est constitué de deux profilés en L articulés entre eux au moyen de deux éléments élastomères, permettant une certaine déformation capable de compenser les inégalités de la voie. Il n'y a pas de suspension primaire, sur les boîtes d'essieu ; pour compenser cette absence, un nouveau modèle de roue résiliente, aux caractéristiques élastiques très élevées, a été développé pour la circonstance.

AnsaldoBreda : son nouveau modèle **Sirio** est une déclinaison de la formule de petits et grands modules alternés ; en construction pour Sassari.

Il a une caisse en acier soudé ; les bogies sont munis de quatre roues indépendantes. Deux moteurs de traction triphasés asynchrones sont fixés latéralement au cadre du bogie. Chaque moteur entraîne, au moyen d'un court arbre de transmission, un réducteur à différentiel mécanique avec couple de blocage. Un engrenage droit entraîne l'une des roues tandis qu'un arbre entraîne l'autre roue de l'essieu fictif à l'aide d'un autre engrenage droit et d'un deuxième accouplement élastique.

Selon le constructeur, cette technique permet d'obtenir à la fois un bon comportement mécanique des bogies bimoteurs traditionnels en ligne droite et les avantages des roues indépendantes en courbe.

La transmission des efforts de traction-freinage du bogie au module de caisse se fait à l'aide de quatre ressorts hélicoïdaux disposés aux quatre coins du cadre du bogie.

Bombardier : à l'instar des autres constructeurs, la branche européenne du constructeur canadien a développé un concept également modulaire dont les premiers exemplaires sont en construction par Graz et Linz, le **Cityrunner**, qui est offert avec deux sortes de bogies.

Dans le modèle de Graz, les bogies sont à roues indépendantes ; quatre onduleurs IGBT alimentent quatre moteurs-roues refroidis par eau et les roues de 715 mm de diamètre ressortent dans des podiums supportant des sièges.

Dans la version pour Linz, le bogie est formé d'un cadre reposant, par une suspension primaire en caoutchouc, sur les boîtes d'essieu, les roues (Ø 560 mm) étant reliées par un essieu. Chaque bogie comprend, sur chaque file de rail, un moteur triphasé asynchrone de 100 kW, suspendu au cadre et entraînant une roue, donc un essieu, au moyen d'un différentiel. Les deux faces libres des roues restantes sont munies des disques de frein. Le plancher qui est à 300 mm au droit des portes s'élève en pente douce à 450 mm au-dessus des bogies.

Bombardier : la filiale suisse, Vevey Technologies, a développé l'**Urbos**, un modèle qui utilise, pour la première fois, des bogies à faible empattement (1,00 m) munis de quatre moteurs de traction. Le très faible encombrement de ce bogie a permis de s'affranchir de



Figure 23 – ULF de Vienne

modules d'intercirculation, de réduire le nombre d'articulations et de permettre une utilisation optimisée des volumes de caisse ; ce modèle est retenu par Leeds.

FIAT : a développé, sur les spécifications de Rome, un tramway modulaire équipé de bogies porteurs aux extrémités.

Siemens : le modèle **ULF (Ultra Low Floor)** (figure 23) a été développé pour le réseau de Vienne. Une rame, unidirectionnelle, est composée de courts modules articulés entre eux. 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. Le plancher est à la cote record de 205 mm et s'abaisse même à 180 mm aux seuils des portes ; à l'arrêt, la rame est dotée d'un système d'agenouillement, ce qui permet d'accéder à la rame sans difficulté depuis la chaussée.

Le tableau **L** en [Form. C 4 440] donne les caractéristiques de ces tramways.

13.6 Remorques

Quelques réseaux ont commandé des remorques à plancher bas attelées à des automotrices. Cela permet d'augmenter, à coût réduit, la capacité d'une rame. À Darmstadt, Leipzig et Rostock, la technologie retenue utilise des bogies à petites roues.

Le réseau de Bâle transforme des remorques existantes classiques, par l'introduction d'une entrée à plancher surbaissé pour permettre l'accès des personnes handicapées.

Le tableau **M** en [Form. C 4 440] donne les caractéristiques de ces tramways.

13.7 Tramways à plancher haut

Tous les réseaux ne sont pas partisans de la formule à plancher bas partiel ou intégral.

Un certain nombre de villes ont en effet fortement investi, au cours des années 1960 à 1990, dans la construction de longues sections en tunnel avec des stations à quais hauts.



Figure 24 – Hanovre : tramway à plancher haut (Alstom LSB)



Figure 25 – Trams-train de Karlsruhe équipé d'un bar (VBK)

On trouve, notamment, la plupart des villes de la Ruhr, de Duisbourg à Dortmund, et de Rhénanie, de Bonn à Cologne, où un vaste réseau d'interconnexion a été réalisé et exploité à l'aide d'un matériau unifié qui a vu le jour à Cologne. Dans les stations en tunnel ou dans l'axe de voies rapides, l'accès aux tramways se fait de plain pied à partir de **quais hauts** mais les rames sont toutes pourvues d'embarcements déployables permettant également l'accès depuis des quais bas aménagés dans la voirie.

Dans certains cas (Hanovre, cf. figure 24, et Bielefeld), la part des quais hauts est prédominante.

À Stuttgart, le réseau classique à voie métrique a été entièrement reconstruit à voie normale, et les quais hauts sont devenus la règle. La circulation dans les rues a été néanmoins maintenue là où cela est possible.

Le tableau N en [Form. C 4 440] donne les caractéristiques de ces tramways.

14. Trams-Trains

Ce nom un peu barbare désigne les tramways qui sont aptes à circuler aussi bien dans les rues des villes que sur les voies de chemin de fer des grands réseaux.

Les trams-trains ont proliféré aux États-Unis, au Canada et en Argentine pendant la première moitié du 20^e siècle avant de disparaître presque complètement devant la concurrence automobile.

Le concept de tram-train a connu récemment une renaissance spectaculaire à Karlsruhe (figure 25) sous forte impulsion du directeur des tramways, Dieter Ludwig.

Après avoir converti une première ligne de chemin de fer régional en ligne de tramway rapide dès 1958, la ville de Karlsruhe se voit

octroyer le droit de reconstruire et d'électrifier une ligne de chemin de fer, réservée aux marchandises, afin de reprendre un service voyageurs très étoffé à l'aide de tramways.

En 1991, le réseau de Karlsruhe reçoit une première tranche de dix tramways articulés bicourants dotés d'un équipement électrique leur permettant de circuler sur le réseau urbain (750 V cc) et sur les voies de chemin de fer de la DB AG électrifiées en courant monophasé 15 000 V 16 2/3 Hz.

Le passage du réseau 750 V au réseau 15 kV, et vice-versa, se fait automatiquement et à pleine vitesse, les deux secteurs étant séparés par une section neutre, le choix du mode d'alimentation étant soumis à la réaction d'un relais à tension nulle et d'un palpeur de tension, le conducteur n'ayant aucune manœuvre à effectuer.

À partir de l'hiver 1991/1992, les nouveaux tramways bicourants remplacent les trains omnibus entre Karlsruhe et Pforzheim (31 km). Le succès est total car les rames de tramway ont des performances bien supérieures à celles des trains et s'insèrent parfaitement dans les sillons horaires du chemin de fer.

Le succès de l'opération vient surtout du fait que, dans les faubourgs de Karlsruhe, les rames quittent les voies ferrées et se raccordent aux lignes urbaines de tramway, offrant ainsi un accès direct de la région au centre ville.

Dix ans plus tard, les tramways d'interconnexion ont remplacé la quasi totalité des trains régionaux, la plus longue ligne reliant Baden-Baden à Heilbronn (105 km) où les tramways terminent au centre ville, cette relation justifiant des rames équipées d'un compartiment bistro et de toilettes chimiques.

La réussite de Karlsruhe a fait rapidement école. En 1997, une première ligne de 18 km relie Sarrebruck (Sarre) à Sarreguemines (Moselle) et le projet prévoit de nombreuses extensions autour de la capitale Sarroise.

Le tramway de la Sarre pénétrant en France, l'expérience ne pouvait plus passer inaperçue dans l'Hexagone. Partant du fait que l'exploitation d'une voie ferrée régionale est plus économique à l'aide de rames de tramways qu'avec des trains lourds, de nombreux projets sont à l'étude pour diverses agglomérations : Strasbourg, Mulhouse, Nantes, Région parisienne, etc.

Le tableau O en [Form. C 4 440] donne les caractéristiques de ces tramways.

15. Métros légers

Le nom de Métro Léger (*Light Rail, Stadtbahn*) a été attribué par l'Union internationale des transports publics aux nouveaux réseaux de tramway circulant intégralement en site propre (plateforme indépendante, tunnel, viaduc, etc.), croisant la voirie en dénivelé ou par passages à niveau. Le matériel roulant est du type tramway.

Parmi les exemples de métros légers on trouve, en Europe, des lignes à Utrecht, Rotterdam, Amsterdam, Lausanne, Gênes ; au Canada, à Edmonton ; aux États-Unis, à Saint-Louis, Boston, Pittsburgh (figure 26), Newark, Cleveland ; au Mexique, à Mexico, Monterrey, Guadalajara ; en Argentine, dans la banlieue de Buenos Aires (Tren del Sol).

16. Esthétique

Dans la majorité des villes qui ont toujours connu des tramways, la notion d'esthétique, extérieure et intérieure, est relativement secondaire car les trams sont considérés comme des objets utilitaires qui ont uniquement un rôle social à assumer.

C'est le constructeur qui dessine le véhicule comme cela lui convient et les compagnies choisissent leur modèle sur catalogue.



Figure 26 – Pittsburgh

Dans certains pays, où les tramways avaient été systématiquement exterminés, comme en France, leur renaissance s'est accompagnée d'une exigence plus grande de qualité au niveau de l'image et du confort. Cela a débuté à Grenoble en 1987 où les formes préconisées par l'architecte étaient tellement osées que le constructeur avait quelque difficulté à intégrer ces idées novatrices dans le domaine ferroviaire où le classique était de bon ton.

L'effet innovateur a presque tourné à la panique lorsque le même architecte a dessiné l'Eurotram de Strasbourg, si transparent, si arrondi que, en fin de compte, pour les techniciens chevronnés, il n'avait plus rien d'un tramway ! Pourtant ce sont ces réalisations qui font l'Histoire...

Aujourd'hui, tous les constructeurs s'attachent les services de designers réputés.

17. Tendances

De 1984 à 1999, la formule du plancher bas partiel a prévalu, numériquement, sur celle à plancher bas total en raison du prix souvent plus élevé de la seconde solution et aussi parce que certains constructeurs n'avaient pas développé les bogies moteurs permettant la continuité du plancher surbaissé sur toute la longueur du véhicule et encore en raison de la méfiance de certains réseaux en face de solutions techniques résolument novatrices.

Cette tendance est en train de s'inverser et tous les constructeurs sont à présent en mesure d'offrir, à prix comparables, des véhicules à plancher bas intégral.

Certains industriels ont beaucoup investi dans la construction de caisses en acier à l'aide d'une robotique très développée. On note cependant une tendance croissante pour la réalisation de caisses en aluminium par soudage ou par boulonnage, cette dernière technique facilitant les réparations. La construction aluminium permet, par rapport à l'acier, d'obtenir un bilan des masses plus favorable et évite, en principe, les problèmes de corrosion.

Sur le plan électrique, la technique des moteurs à collecteur, à courant continu, régulés par hacheur, a fait place à l'emploi de moteurs triphasés asynchrones.

Si, dans les premières réalisations du genre, les moteurs étaient alimentés, par groupe de deux, par un onduleur commun, l'évolution technologique conduit, de plus en plus, à prévoir un onduleur par moteur de traction.

Glossaire

Auxiliaires : équipements électriques embarqués qui ne participent pas à la traction : éclairage, sonorisation, confort climatique, air comprimé, etc.

Blochets : petits cubes de béton, reliés par une entretoise, destinés à supporter deux rails ; dans certains cas, on remplace les traverses par des blochets

Bogie : ensemble de quatre roues indépendantes ou reliées, par deux, par un essieu. La dénomination de l'Union internationale des chemins de fer est appliquée

Caisse : châssis habillé, aménagé, doté de tous les équipements électriques, mécaniques, électroniques et pneumatiques

Châssis : élément de carrosserie à l'état nu, sans habillage, ni aménagements, ni équipements

CVS : convertisseur statique, faisant office de transformateur à courant continu ; alimenté sous la tension de ligne (750 V), il restitue des tensions diverses pour l'alimentation des auxiliaires

Freinage rhéostatique : mode de freinage électrique où les moteurs se comportent en générateurs et débitent sur un banc de résistances embarqué (rhéostat)

Haut-le-pied : se dit d'un tramway qui circule à vide, sans marquer d'arrêt pour prendre des voyageurs, pour retourner au dépôt par exemple

Manipulateur : organe linéaire ou rotatif, situé sur le pupitre de conduite, actionné par la main du conducteur pour transmettre les consignes d'accélération ou de freinage à la logique de conduite de la rame ; largement répandu en Europe de l'Ouest, il est souvent remplacé, à l'Est ou en Amérique, par une pédale, actionnant un transmetteur angulaire, qui assure les mêmes fonctions que sur un trolleybus

Marche sur l'erre : lorsque, une fois lancé, le tramway circule sans accélérer ni freiner, le manipulateur au point 0, on dit qu'il roule sur l'erre (terme marin)

Onduleur : convertisseur alimenté en courant continu et fournit du courant alternatif, généralement triphasé, pour l'alimentation des moteurs de traction asynchrones

Pantographe : appareil articulé, maintenu déployé par un ressort, qui assure la captation de l'énergie de la ligne aérienne pour la transmettre aux équipements électriques ; le pantographe est surmonté d'un archet pourvu de bandes de carbone pour garantir un bon contact, non génératrice de parasites, au niveau de la ligne aérienne ; le pantographe a remplacé la perche à frotteur

Patin électromagnétique : mode de freinage d'urgence par des patins, suspendus au cadre du bogie à environ 5 mm au-dessus du rail ; chaque patin comprend des spires qui, lorsqu'elles sont alimentées par la batterie du véhicule, transforment le patin en un puissant électro-aimant qui est attiré par le rail en acier avec une force de 5 t à 6 t, indépendamment des conditions d'adhérence du moment ; il y a, en général, deux patins par bogie et cet équipement est obligatoire

Récupération : mode de freinage électrique où les moteurs de traction restituent de l'énergie à la ligne de contact ; cette énergie est absorbée, soit par un autre tramway, voisin, qui démarre, soit par la sous-station la plus proche

Roue élastique : roue dont le corps et le bandage sont séparés par une couronne en caoutchouc assurant un filtre contre les vibrations et un roulement plus silencieux, disposition de règle sur tous les modèles de tramways

Sablières : réservoirs embarqués, remplis d'un sable spécial que l'on éjecte, automatiquement, sous les roues motrices en cas de patinage

Suspension primaire : ressorts, souvent en caoutchouc, qui supportent, au niveau des boîtes d'essieu, le châssis du bogie, et assouplissent le guidage des roues en courbe

Suspension secondaire : suspension faite au moyen de ressorts hélicoïdaux ou d'éléments en caoutchouc, ou de ballons pneumatiques, et disposés entre le bogie et la caisse

Timbre : avertisseur à cloche électrique obligatoire sur les tramways urbains

Liste des mots clés

PCC	VA
<i>Poste de commande centralisée</i>	<i>Veille automatique</i>
§ 3	§ 2
SAE	cc
<i>Système d'aide à l'exploitation</i>	<i>courant continu</i>
§ 4	§ 13
GTC	tramway
<i>Gestion technique centralisée</i>	tram-train
§ 5	pantographe
	rail§ 9
	voie§ 9
	bogie

Situation de l'article

N° de traité : 25

N° de rubrique : 32

N° de sous-rubrique : 10

N° de volume :