

RÉGIE AUTONOME DES TRANSPORTS PARISIENS

LE MATÉRIEL ROULANT
SUR PNEUMATIQUES
DU MÉTROPOLITAIN PARISIEN



LE MATÉRIEL ROULANT SUR PNEUMATIQUES DU MÉTROPOLITAIN PARISIEN

PREMIÈRE PARTIE

GÉNÉRALITÉS

1 - Évolution et renouvellement du matériel roulant du réseau ferré urbain

Le matériel roulant ferroviaire et surtout celui des chemins de fer souterrains métropolitains a une durée de vie remarquablement élevée.

Les conditions très dures du service et les surcharges importantes auxquelles les caisses sont soumises, imposent aux éléments constitutifs des bogies et des caisses des dimensionnements qui donnent aux voitures une robustesse exceptionnelle.

Les organes actifs mécaniques, électriques et pneumatiques sont conçus pour de très nombreux fonctionnements et doivent fournir un service sans défaillance, tout incident technique, même minime, pouvant créer une perturbation très gênante, ou même dangereuse pour le public.

Cette robustesse de la structure, cette sécurité de fonctionnement des organes constitutifs, ainsi qu'un service assuré de façon permanente à l'abri des intempéries, et par conséquent de la corrosion, confèrent à ce matériel, au prix de révisions somme toute peu importantes, une longévité qui semble pouvoir être séculaire.

●

L'histoire du matériel roulant du métropolitain caractérisé par cette longévité comprend plusieurs périodes très définies.

De 1900, origine du réseau, à 1907 ou 1908, les techniques ont évolué très rapidement ; les voitures initiales courtes, à essieux parallèles et à caisse en bois ont été progressivement transformées ou remplacées à mesure que les besoins de l'exploitation et de la sécurité devenaient mieux connus.

C'est entre 1908 et 1913 que s'est précisée la forme optimale convenant à un réseau métropolitain et particulièrement à celui de Paris :

- voitures métalliques à bogies, à portes nombreuses ;
- traction à unités multiples, c'est-à-dire avec plusieurs motrices télécommandées, accouplées à un nombre variable de remorques, permettant un fonctionnement réversible avec des manœuvres rapides aux terminus.

Entre 1920 et 1938, le réseau métropolitain a fait l'objet d'une extension très importante dans Paris comme en banlieue ; près de deux mille voitures ont été construites pendant cette période, sur un modèle

à peu près invariable. L'interchangeabilité parfaite qui en résultait était indispensable pour assurer sans à-coup les allongements ou modifications de tracé des lignes et les modifications respectives des parcs élémentaires affectés à chacune d'elles.

Le matériel de cette période est caractérisé par des caisses de 14,200 m avec 4 portes de 1 m d'ouverture de chaque côté, des motrices à 4 moteurs (contre deux antérieurement) avec équipement électrique de traction monté principalement sous la caisse, permettant d'utiliser une loge de conduite de faible surface.

Pendant cette période, le matériel construit antérieurement a été transformé, quant à son équipement électrique et pneumatique, pour permettre l'accouplement avec le matériel plus récent. Ce matériel quelque peu modernisé reste toutefois pénalisé par sa faible capacité — caisses plus courtes et grandes loges —, par sa moindre puissance — moteurs plus faibles ou moins nombreux — et par son aménagement intérieur périmé.

Au lendemain de la dernière guerre, le parc du métropolitain comprenait ainsi 750 voitures construites entre 1908 et 1913, et 1 980 voitures construites entre les deux guerres. Malgré le service intense fourni pendant l'occupation et les lacunes de l'entretien à cette époque, ce parc ne montrait aucune trace de fatigue.

Son renouvellement a dû pourtant être prévu :

— parce que ses dispositions intérieures ne correspondaient plus aux normes du confort du public — sièges, portes, éclairage — et aux conditions de travail du personnel de conduite et d'entretien ;

— parce que le matériel d'avant 1914 n'avait qu'une efficacité réduite de par ses dimensions et sa puissance ;

— et surtout, au moment où la capacité de transport des lignes se trouve saturée par l'augmentation du peuplement de la région parisienne, parce que le matériel construit avant 1938 a des possibilités de transport inférieures à celles qui peuvent être fournies par un matériel moderne utilisant toutes les ressources de la technique moderne : capacité et performances.

Le renouvellement ne peut se faire par conséquent que par un type de voiture très différent du type existant.

La transformation d'une ligne doit s'effectuer en totalité très rapidement pour éviter les inconvénients d'une exploitation mixte.

On peut, compte tenu de l'étalement dans le temps de la dépense importante nécessaire, envisager à

partir de maintenant un rythme de transformation d'une ligne tous les quatre ans, qui permettrait d'éliminer vers 1975 le matériel antérieur à 1914 et vers 2000 celui qui est antérieur à 1940, ce qui donnerait une durée de vie moyenne de 60 ans.

2 - Le matériel articulé de la ligne n° 13

Après la guerre, un prototype entièrement nouveau de matériel a été étudié en profitant des derniers progrès de la technique ferroviaire. Ce modèle est constitué par des éléments accouplables pouvant former des trains de 73 m (longueur normale des stations : 75 m) ou de 36,60 m ; cette disposition était intéressante pour des lignes à charge très variable de type suburbain, sur lesquelles la réduction du matériel utilisé aux heures creuses était avantageuse pour le maintien de faibles intervalles.

Ce modèle a servi à l'équipement de la ligne n° 13, lors du prolongement de sa branche Est, de la porte de Saint-Ouen au carrefour Pleyel, mis en service en 1952. Quarante éléments ont été construits, correspondant à 100 voitures du type actuel.

Malheureusement, la constitution de ce matériel — 3 caisses articulées sur 4 bogies — imposée par le découplément, par la faible rayon des lignes du réseau souterrain et par la recherche du moindre poids, ne permet pas d'obtenir des trains ayant la capacité maximale permise par la longueur actuelle des quais. Ce matériel est donc impropre à l'équipement efficace de lignes à gros débit.

Il n'a donc pas été retenu pour le renouvellement systématique du parc. Toutefois, ayant été étudié de façon complètement nouvelle dans tous ses moindres détails, il a pu servir de modèle en ce qui concernait la structure, les éléments du confort offert aux voyageurs, la conduite ou l'entretien, pour les constructions ultérieures.

3 - Historique du matériel sur pneumatiques

En 1950, l'attention de la Régie a été attirée sur l'intérêt qu'il y aurait, pour le métropolitain, à utiliser le roulement de pneumatiques sur des pistes larges.

L'idée d'utiliser le pneumatique pour le chemin de fer remontait à 1929, et plusieurs applications, avec roulement sur le rail normal, en avaient été faites : en 1931 sur des automotrices dites « Michelin », en 1949 sur des rames complètes remorquées (Paris-Strasbourg). Mais cette application présentait une difficulté essentielle : la faible largeur du chemin de roulement qui, compte tenu de la charge admissible pour un pneumatique, imposait la multiplication des essieux et un allègement très coûteux du matériel.

A la suite d'études faites par les services de la Régie, un nouveau système de roulement et de guidage a été mis au point. Ce système a fait l'objet, à partir de 1951, d'essais très poussés grâce à l'équipement d'une courte ligne de 770 m, exploitée en navette entre la Porte des Lilas et le Pré-Saint-Gervais, et à la construction d'une voiture expérimentale.

Ces essais ayant montré les avantages du système, l'absence de toute difficulté et de tout danger dans les circonstances normales ou exceptionnelles d'exploitation, il fut décidé d'équiper une ligne entière en se limitant toutefois à une ligne courte et relativement peu chargée.

Il s'agissait, en effet, de mettre à l'épreuve le nouveau matériel et le dispositif de voie avant de procéder à l'équipement d'une des lignes importantes du réseau. L'essai devait porter non seulement sur le dispositif de roulement des voitures, mais aussi sur tous les appareillages de commande de traction et de freinage, et même sur la commande des portes, tous dispositifs concourant à l'obtention de l'intervalle le plus réduit entre trains.

C'est la ligne n° 11 « Châtelet-Porte des Lilas » de 6,5 km de longueur qui a été choisie ; la transforma-

tion de la voie et la construction du matériel, entreprises en 1954, ont permis la mise en service du premier train en novembre 1956 et l'exploitation complète en octobre 1957. La ligne est exploitée depuis cette date avec 16 trains de quatre voitures (fig. 1), trois motrices et une remorque, cette composition, surabondante en essieux moteurs, ayant été adoptée en raison du profil accidenté de la ligne.

Le matériel a été construit par deux groupes de constructeurs, mis techniquement en concurrence, les matériels fournis, tout en restant totalement accouplables et utilisables indifféremment par l'exploitation, présentent de très nombreuses différences constructives.

L'exploitation de la ligne n° 11 a permis de vérifier, de façon valable, les avantages du roulement sur pneumatiques dans les conditions les plus extrêmes de l'exploitation. Toutes les dispositions techniques nouvelles ont été mises à l'épreuve, et un choix a pu être fait en connaissance de cause, entre les différentes solutions techniques constructives, pour déterminer le matériel à adopter pour le renouvellement de lots plus importants du parc existant.

48 062 bis



Fig. 1. — Matériel roulant sur pneumatiques

C'est la ligne n° 1 qui, après la ligne n° 11, a bénéficié du renouvellement de son matériel. Cette ligne, la plus chargée du réseau, avait atteint une saturation qui contraignait ses usagers à des compressions gênantes et à des attentes dans les accès et correspondances. Le remplacement de ses trains par des rames modernes et sur pneumatiques devait accroître ses possibilités de transport en raison de leur capacité supérieure et de leurs meilleures performances. Mais le développement continu du trafic des heures de pointe n'aurait pas rendu cette mesure suffisante, aussi a-t-il été décidé de procéder simultanément à l'allongement des trains, de 5 à 6 voitures, un certain nombre de stations ayant dû être modifiées en conséquence en 1962 et 1963.

La ligne ainsi transformée pourra faire face à l'accroissement du trafic jusqu'au moment où la mise en service de la ligne régionale Est-Ouest à grand gabarit viendra donner, à l'axe principal des activités de la région parisienne, l'armature de transports correspondant à son importance.

La ligne n° 1 est donc exploitée par des trains sur pneumatiques de six voitures dont quatre motrices et deux remorques : 272 voitures, nécessaires pour faire circuler 41 trains, ont été livrées en 1963 et 1964. Les travaux de transformation et d'allongement des quais ont été terminés en mai 1963, au moment de la livraison de la première rame. Le remplacement projeté du matériel ancien par le matériel nouveau s'est poursuivi jusqu'à la fin de 1964.

L'équipement d'une nouvelle ligne va être entrepris. Il s'agit de la ligne n° 4, dont les trains seront portés préalablement de 5 à 6 voitures.

4 - Principe du roulement et du guidage (fig. 2)

Le système sur pneumatiques du métropolitain parisien conserve deux des dispositions mécaniques essentielles du chemin de fer classique :

— le bogie à 2 essieux, ensemble mécanique simple et robuste qui assure la répartition des charges entre la caisse et les roues, ainsi que l'orientation de ces roues par rapport à la caisse ;

— les appareils d'aiguillage de la voie ferrée normale avec leurs multiples combinaisons, qui assurent, avec un faible encombrement, de façon positive et sûre, les manœuvres des rames en agissant sur le mentonnet métallique des roues.

Chaque bogie comporte quatre roues principales porteuses, munies de pneumatiques, qui circulent sur deux pistes, larges de 23 à 24 cm, encadrant la voie ferrée de type normal, au même niveau que la table de roulement des rails.

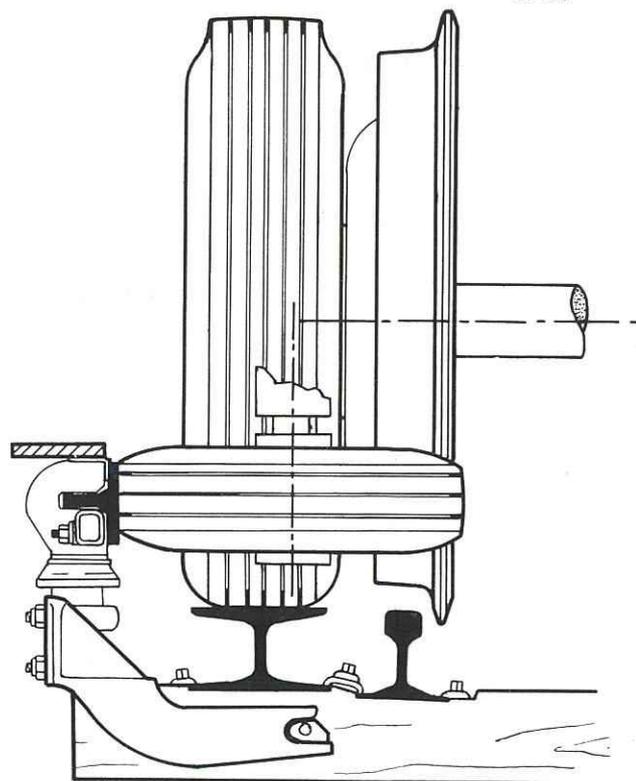


Fig. 2. — Principe du roulement et du guidage

Le guidage du bogie est assuré par quatre roues horizontales, de plus faible diamètre, également munies de pneumatiques, disposées aux angles du bogie ; ces roues prennent appui sur deux barres de guidage qui complètent la voie.

A chaque roue porteuse est accolée une roue métallique auxiliaire, analogue à une roue classique de chemin de fer — mais plus légère — se déplaçant au-dessus du rail ; mais normalement il n'y a aucun contact entre cette roue et le rail. En voie courante, ce n'est qu'en cas de crevaison d'un pneumatique porteur ou d'un pneumatique de guidage que la roue de sécurité vient porter sur le rail métallique, par sa table de roulement ou son mentonnet.

Au passage des appareils de voie, les barres de guidage sont interrompues sur une file ; le guidage est alors assuré par les roues de sécurité dont les mentonnets prennent appui de façon classique contre les rails ou contre-rails de la voie ferrée (deux contre-rails, au droit de l'interruption, assurent la continuité de la sécurité du guidage latéral). Les pistes de roulement assurent, elles, de façon continue, le support des roues porteuses, malgré les interstices que comportent les appareils de voie.

L'alimentation des trains en courant de traction est faite par les barres de guidage latérales, qui sont montées sur isolateurs, le retour se faisant par les rails normaux. Les bogies comportent à cet effet des frotteurs à déplacement latéral pour une des polarités et des frotteurs à déplacement vertical pour l'autre, ces derniers étant connectés à la masse de la voiture.

La signalisation est du type classique avec « circuits de voie » constitués par la voie normale, dont le shuntage est opéré par les frotteurs de retour de courant de traction.

Ce système de voie permet donc aussi bien la circulation des trains sur pneumatiques et de trains à roulement classique ; ces derniers doivent alors être équipés, en plus des frotteurs de prise de courant actuels du métropolitain, à course verticale, de frotteurs nouveaux à course horizontale.

Cette possibilité d'exploitation mixte est essentielle pour la transformation d'une ligne existante qui doit s'effectuer sans interrompre le service journalier, en remplaçant progressivement, ce qui peut durer plusieurs mois, le matériel actuel par le matériel nouveau.

Elle permet, pour l'équipement de la ligne comme pour son entretien ultérieur, d'utiliser des trains de travaux composés de matériels des types courants : tracteurs, plates-formes, engins spécialisés.

L'utilisation des appareils de voie classique, mis au point par une longue expérience ferroviaire, est très importante pour un réseau métropolitain : l'implantation en est facile grâce à leur faible encombrement dans les terminus souterrains dont le tracé complexe est indispensable à la rapidité des manœuvres de retournement, de garage et de dégarage.

5 - Avantages du roulement sur pneumatiques

Le roulement sur pneumatiques présente des avantages multiples touchant le confort du public, l'efficacité et l'économie de l'exploitation, la construction et l'entretien du matériel.

a - Le confort des voyageurs est accru par la douceur du roulement et de la suspension, mais surtout par la suppression du bruit de roulement. Ce dernier avantage est particulièrement sensible pour un chemin de fer souterrain où la ventilation se fait par des baies ouvrantes ou des orifices spéciaux d'entrée et de sortie d'air. En effet, le bruit important engendré par le roulement d'une roue métallique sur un rail métallique se réfléchit contre les parois du tunnel et atteint les voyageurs par les ouvertures de ventilation ; seules des caisses étanches à l'air, donc à atmosphère intégralement conditionnée, pourraient mettre les voyageurs à l'abri de ces bruits.

b - L'adhérence des pneumatiques sur leur piste permet une augmentation des performances de démarrage et de freinage, sans avoir recours à l'adhérence totale — un moteur par essieu — ou au freinage dynamique. Les accélérations normales ne sont limitées que par le confort des voyageurs qui, étant en grande partie debout aux heures d'affluence, ne peuvent supporter sans désagréments des accélérations supérieures à $1,3 \text{ m/s}^2$ et des décélérations supérieures à $1,45 \text{ m/s}^2$ au maximum (sous la condition, d'ailleurs, que l'application en soit progressive). Toutefois, les freinages d'urgence peuvent être poussés jusqu'à 2 m/s^2 .

Ces avantages sont très sensibles pour un chemin de fer urbain à arrêts rapprochés, où le débit d'une ligne est déterminé par l'intervalle minimal de temps qui se trouve lui-même imposé par l'occupation par les trains des stations les plus fréquentées : cette occupation résulte des temps de freinage et de démarrage du matériel qui se trouvent réduits par l'utilisation de pneumatiques.

Il convient de noter toutefois que le roulement sur pneumatiques donne une résistance à l'avancement supérieure à celle du roulement métallique. Cet inconvénient serait grave pour les lignes ferroviaires à points d'arrêts éloignés, il est minime pour les lignes à stations rapprochées. Sur de telles lignes, en effet, la consommation d'énergie correspond surtout à celle qui est développée au démarrage et qui se trouve dissipée en chaleur à l'arrêt suivant ; pour des stations rapprochées, cette énergie est prépondérante par rapport à celle qui est absorbée par le roulement.

De plus, les calculs montrent qu'à vitesse commerciale égale sur une interstation, l'énergie absorbée par le démarrage est d'autant plus faible que la mise en vitesse est plus rapide ; le pneumatique fait donc gagner sur le démarrage, s'il fait perdre sur le roulement.

L'adhérence permet pour des lignes nouvelles le franchissement de rampes très importantes : elle permet en outre de maintenir la vitesse d'un train à sa valeur normale dans le cas où une de ses motrices est inactive en raison d'une panne mineure, ce qui est un avantage sensible pour une ligne urbaine où la régularité de l'exploitation est d'un grand prix.

c - Le pneumatique permet enfin, à robustesse égale, de réduire de façon sensible le poids du matériel dont les organes ne sont plus soumis aux chocs du roulement. Il constitue un premier étage de suspension du bogie, dont la structure se trouve, sur ce point, simplifiée ; il doit permettre de réduire les fatigues dues à un service intense, qu'il s'agisse du matériel roulant ou de la voie dont les dépenses d'entretien doivent s'abaisser.

6 - Sécurité et durée d'utilisation des pneumatiques

Le pneumatique tel qu'il est utilisé sur le métropolitain donne une sécurité d'emploi totale.

Cette sécurité a été démontrée d'une part par les essais multiples effectués sur la voiture expérimentale, et d'autre part par les résultats d'exploitation de la Régie.

L'éclatement d'un pneumatique ou son inflammation en service paraissent impossibles ; les ingénieurs de la Régie n'ont jamais réussi à en provoquer malgré les tentatives les plus poussées : percement par pointe, brûlure par arc, enrayage prolongé. Dans ce dernier

cas, le caoutchouc fond et lubrifie le glissement qui s'effectue sur les toiles, l'odeur du caoutchouc étant suffisante pour alerter le personnel.

En ligne, au cours d'une exploitation de près de cinq ans pendant laquelle les roues ont parcouru chacune en moyenne 280 000 km, on n'a pu constater que huit crevaisons, par corps étrangers, qui n'ont été décelées que dans les terminus, grâce à un dispositif spécial prévu à cet effet.

La tenue des pneumatiques quant à leur usure est remarquable ; contrairement à toute attente, un parcours de plus de 300 000 km ne provoque pas, en moyenne, l'usure de la bande de roulement nécessitant le retrait de la roue.

DEUXIÈME PARTIE

ÉQUIPEMENT DE LA LIGNE N° 1 AVEC DU MATÉRIEL SUR PNEUMATIQUES

I - LA VOIE

Deux types de pose de voie différents ont été utilisés pour l'équipement des voies principales de la ligne n° 1 :

- piste en béton sur assise béton : en station et aux abords des stations ;
- piste métallique sur traverses et ballast : sur voies principales entre stations ;

les barres de guidage et les rails sont les mêmes dans les deux cas.

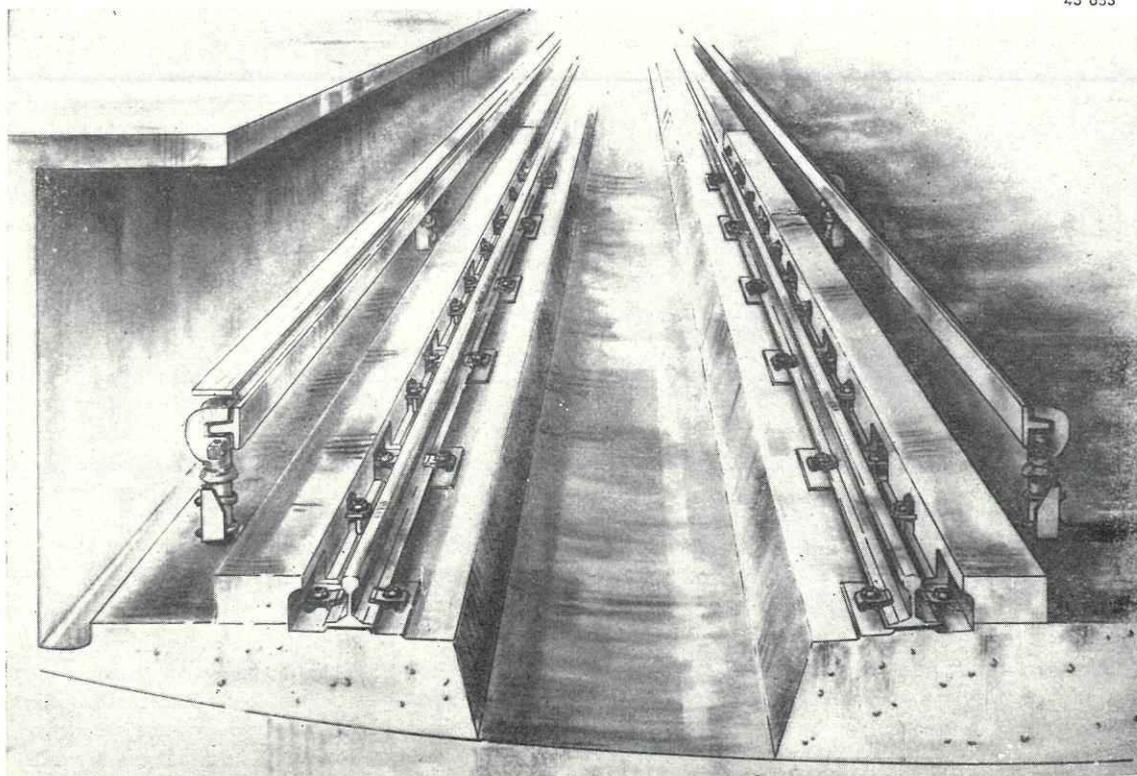


Fig. 3. — Piste en béton armé massive

43 633

1 - Piste béton posée sur béton (fig. 3)

En station, la hauteur relative du quai par rapport au rail a dû être augmentée pour la mise en service du matériel sur pneumatiques qui a été prévu avec une hauteur de plancher plus grande que le matériel actuel. Cette modification s'effectue dans presque toutes les stations par abaissement des voies, abaissement qui n'aurait laissé entre les traverses et le radier du souterrain qu'une épaisseur trop faible de ballast. Il est donc nécessaire de prévoir pour la voie une assise de béton liée au radier, et intéressant d'utiliser le type de piste de roulement qui serait à préconiser pour une ligne nouvelle.

Il s'agit d'éléments de piste en béton armé de 5,40 m de longueur ; le béton est constitué par des agrégats concassés très durs mélangés à une forte proportion de ciment. Chaque élément repose sur l'assise avec interposition d'une semelle mince plastique ; la fixation est faite par des pattes métalliques faisant saillie latéralement sur l'élément de piste et par des boulons scellés dans l'assise. Le rail normal, dont les longueurs entre joints de signalisation sont préalablement soudées, est également fixé à l'assise de béton, avec utilisation d'attaches élastiques.

La barre de guidage, en forme de T couché, est également fixée au massif de béton par l'intermédiaire

de supports composés avec partie isolante, écartés de 2,70 m. La barre est fixée à chaque support par des goujons soudés à la barre, au moment de la pose, par un appareillage spécial de soudure électrique instantanée.

La barre de guidage du côté de l'extérieur des voies porte une planche horizontale de protection permettant, dans les interstations, la circulation sans danger du personnel le long du pied-droit du tunnel.

2 - Piste métallique sur traverses et ballast (fig. 4)

Dans les interstations de voie courante, la pose de voie classique sur traverses et ballast a été adoptée. Les traverses sont toutefois remplacées, à l'occasion de la transformation, par des traverses neuves en azobé, bois africain très résistant et très durable, l'intervalle en est resserré dans les courbes.

La piste est constituée par un profilé métallique, laminé spécialement pour cet usage, en forme de H couché à très larges ailes. Ce profilé se fixe sur les traverses comme un rail courant par sa base ; il est soudé bout à bout, sauf aux joints isolants où il est éclissé.

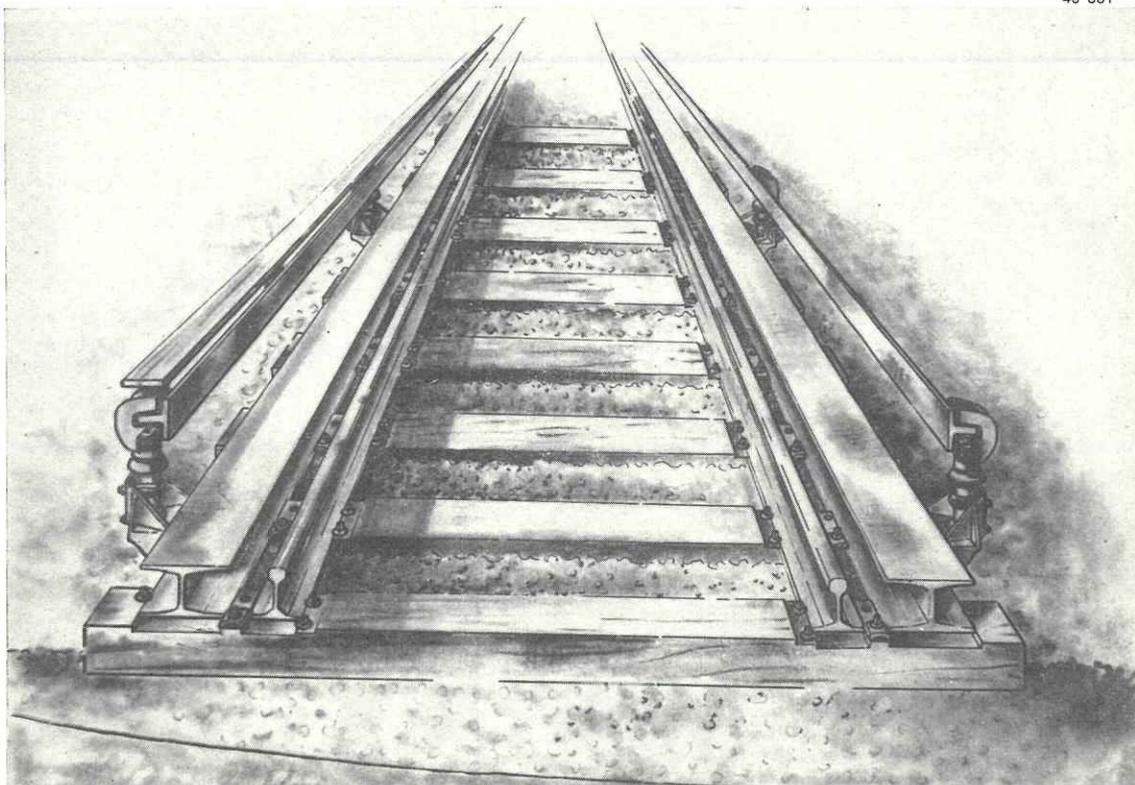


Fig. 4. — Piste métallique posée sur traverses et ballast

43 681

FR-E 817 A

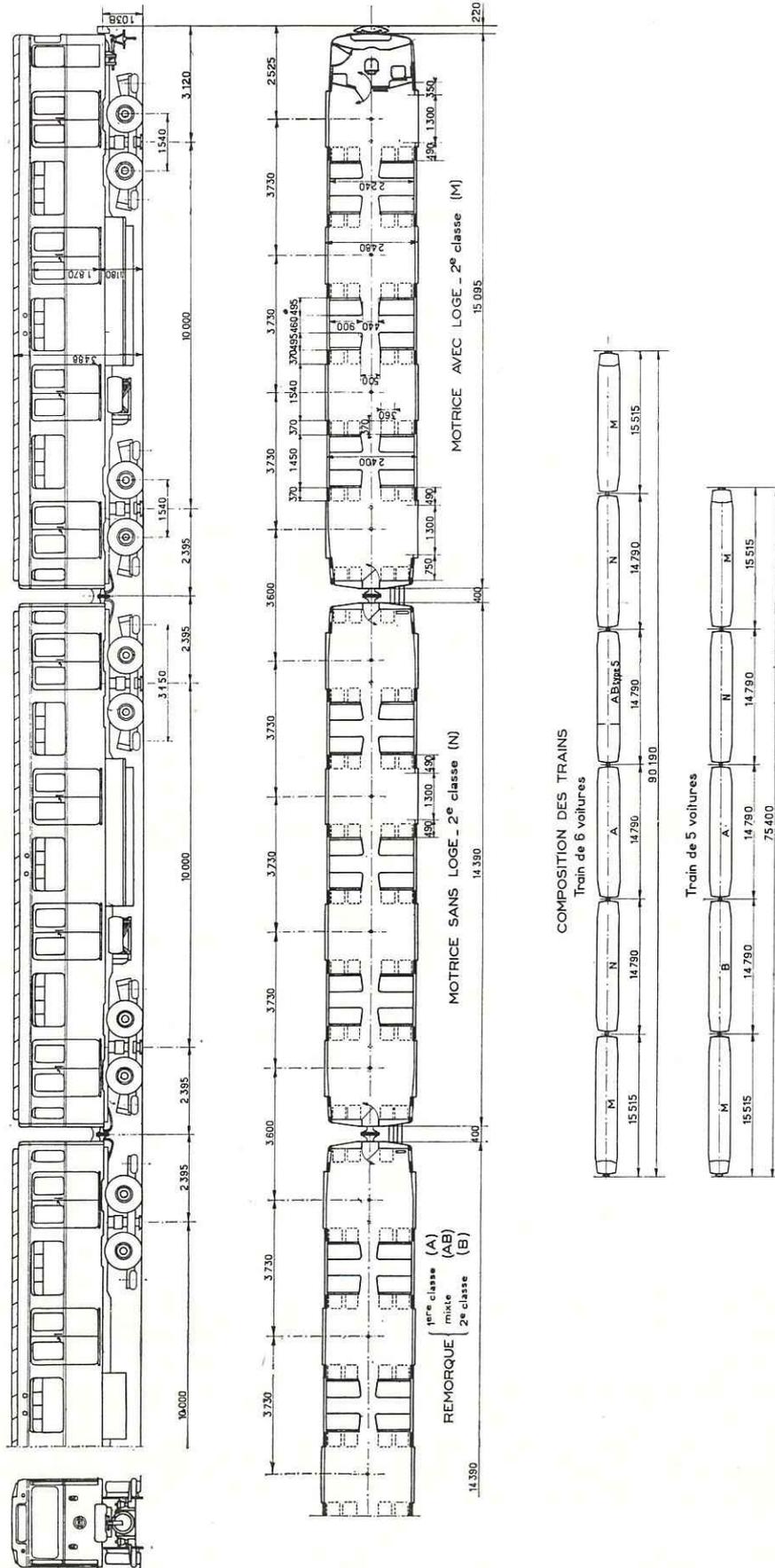


Fig. 5. — Diagramme du matériel de la ligne n° 1

L'utilisation d'un profilé métallique de grande longueur permet une pose rapide, elle renforce l'ensemble constitué par les rails et les traverses pour leur donner une excellente rigidité.

Les barres de guidage sont supportées par des traverses spéciales (une toutes les 4 traverses) complétées à chaque extrémité par des socles métalliques sur lesquels sont boulonnés les supports isolants.

L'utilisation de pistes métalliques ne présente aucun inconvénient au regard de la sécurité, des essais ont montré que le maintien d'un arc permanent qui pourrait être amorcé par la chute d'un objet conducteur, possible avec la voie actuelle, ne l'était plus avec la voie nouvelle en raison de la forme et de la position des barres.

3 - Voies secondaires

Sur les voies secondaires, la piste est constituée par des longrines en azobé. C'est ce type de piste qui avait été utilisé sur la ligne n° 11, mais le bois a montré une certaine tendance à la déformation aux joints. Cet inconvénient n'est pas grave pour les voies secondaires, et le bois permet un usinage facile pour les éléments de pistes qui encadrent les appareils de voie.

4 - Processus de transformation de la voie

La transformation de la voie s'effectue en plusieurs phases :

a - soudure bout-à-bout du rail, entre les joints isolants ;

b - phases de constitution de l'assise : béton ou nouvelles traverses, avec report des rails sur ce nouveau support ;

c - pose des barres de guidage et mise en service de ces barres pour l'alimentation des trains en courant de traction ; pour cette phase, les voitures en service doivent être équipées des deux systèmes de frotteurs : à déplacement vertical pour le rail de traction actuel, à déplacement horizontal pour les nouvelles barres ;

d - dépose du rail de traction actuel ;

e - pose des pistes, la place de l'une d'elles étant libérée par la suppression du rail de traction actuel.

La transformation de la ligne, entreprise en 1960, a été terminée en 1963.

II - LE MATÉRIEL ROULANT

1 - Composition des trains

Trois types de voitures sont utilisés pour la composition des rames de longueurs diverses nécessaires pour l'exploitation des différentes lignes du réseau :

- motrice d'extrémité de train avec loge de conduite ;
- motrice intermédiaire sans loge de conduite ;
- remorque (1^{re} classe, 2^e classe ou mixte).

Il était avantageux, à divers points de vue, de choisir des types de motrices différents pour les voitures extrêmes et les voitures intermédiaires, contrairement aux errements antérieurs du chemin de fer métropolitain.

En effet, l'aménagement de la loge de conduite, sur un matériel de faible largeur (2,40 m), se concilie difficilement avec la présence d'une porte d'intercirculation en bout de caisse, porte qui est indispensable le long d'un train ; la suppression de cette porte permet, en plaçant le conducteur dans l'axe, de lui donner une excellente visibilité. La loge occupe alors toute la largeur de la caisse, et le chef de train qui accompagne le conducteur peut accéder, pour l'exécution de son service, aux deux portes latérales prévues à cet effet.

L'écartement maximal des axes des bogies (10 m), la longueur des caisses (14 à 15 m), sont imposés par les courbes existant sur le réseau. Le diagramme des voitures se trouve déterminé par le choix du nombre et de la dimension des portes ; celles-ci ont une influence très grande sur les temps de stationnement, pour faciliter au mieux les échanges de voyageurs pendant les arrêts — donc sur le débit des lignes. Ces portes sont disposées de façon à présenter une distance à peu près égale entre elles tout le long du train pour assurer rapidement une bonne répartition des voyageurs dans les voitures.

La longueur des voitures courantes — 14,390 m hors caisse, 14,790 m entre axe des attelages pour les voitures intermédiaires — peut être accrue pour les voitures extrêmes par augmentation du porte-à-faux (15,095 m hors caisse, 15,515 m entre axe des attelages) ; ceci permet, malgré la présence de la loge, une disposition de la caisse pour les voyageurs très voisine sur tous les types de voiture et, finalement, une surface de plancher utile sensiblement supérieure, pour un train, à celle du matériel ancien.

La composition des trains prévue pour les diverses lignes du réseau est la suivante (fig. 5) :

- 4 voitures : trois motrices et une remorque (cas de la ligne n° 11 avec fortes rampes), ou deux motrices et deux remorques ;
- 5 voitures : trois motrices et deux remorques ;
- 6 voitures : quatre motrices et deux remorques (cas de la ligne n° 1 à forte surcharge avec nécessité impérieuse de maintenir la régularité), ou trois motrices et trois remorques sur les lignes faciles.

Les voitures d'une rame sont attelées entre elles par des coupleurs mécaniques automatiques très simples formant, après attelage, une barre rigide de faible encombrement, articulée élastiquement sur les châssis de caisse ; les extrémités d'une rame sont munies du dispositif unifié du métropolitain, à tampon central.

2 - Caractéristiques dimensionnelles

Bogie

« Voie » des roues porteuses	1,980 m
Écartement des rails	1,440 m
Écartement des barres de guidage	2,440 m
Hauteur de l'axe des barres de guidage au-dessus des rails et pistes	0,175 m
Empattement des roues porteuses	1,540 m
Empattement des roues de guidage	3,150 m

Caisse

Longueur hors tout :	
Motrice avec loge	15,515 m
Autres voitures	14,790 m
Longueur de caisse :	
Motrice avec loge	15,095 m
Autres voitures	14,390 m
Entre-axe des pivots de bogie	10,000 m
Largeur de caisse	2,400 m
Hauteur totale au-dessus du rail	3,488 m
Hauteur du plancher au-dessus du rail	1,180 m
Hauteur du quai au-dessus du rail	1,070 m

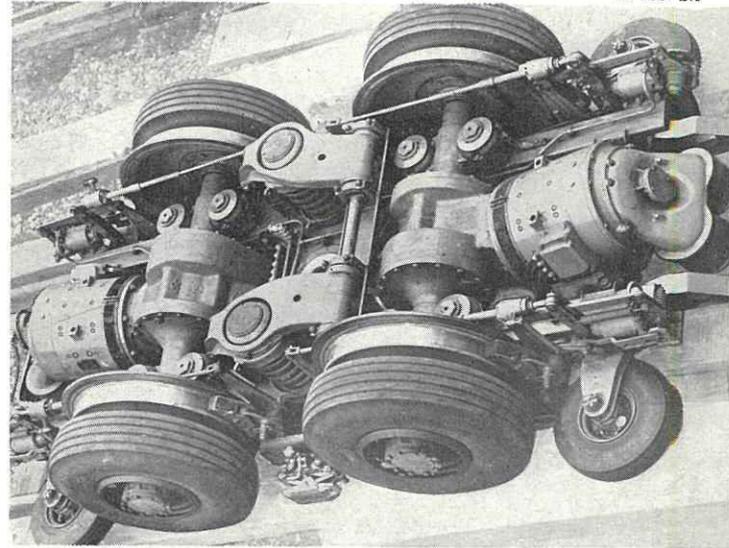


Fig. 6. — Bogie

Poids

	à vide	sous charge normale (1)
Motrice avec loge	23,6 t	34,7 t
Motrice sans loge	22,8 t	34,4 t
Remorque	16,0 t	27,6 t

3 - Les bogies (fig. 6)

Le bogie constitue l'élément le plus original du nouveau matériel, celui qui a été le plus marqué dans sa conception par l'utilisation des pneumatiques pour le roulement et le guidage. Il comporte des organes qui, comme les essieux, procèdent de la technique habituelle des véhicules routiers gros porteurs, et d'au-

Capacité (1)

	VOYAGEURS A L'HEURE D'AFFLUENCE			Voyageurs assis aux heures creuses Sièges de strapontins
	Assis	Debout	Total	
Motrice avec loge, 2 ^e classe (M)	24	135	159	52
Motrice sans loge, 2 ^e classe (N)	24	142	166	55
Remorque { 1 ^{re} classe (A)	24	142	166	55
2 ^e classe	16	104	120	39
Train de 6 voitures (M-N-A-AB-N-M) {	32	180	212	71
	112	658	770	253
	144	838	982	324

(1) Charge normale : voyageurs assis + voyageurs debout à raison de 0,17 m² par place sur les plates-formes et couloirs.

tres qui, comme le frein, restent très proches des solutions classiques mises en œuvre sur les matériels ferroviaires.

L'adhérence élevée du pneumatique sur la piste nécessite l'indépendance en rotation des roues d'un même essieu, ce qui conduit, pour l'essieu de remorque, à un montage à roues indépendantes sur un axe fixe, et pour l'essieu de motrice à une transmission par différentiel. L'entraînement de l'essieu moteur par le moteur de traction devant en outre se faire par l'intermédiaire d'un réducteur à rapport élevé — le moteur ayant été prévu à grande vitesse de rotation pour en réduire le volume et le poids —, il était avantageux de donner à cet essieu la structure d'un pont, du type automobile poids lourd, portant sur flasque le moteur disposé longitudinalement.

Les bogies sont donc constitués par deux essieux — ou plutôt deux « ponts » — auxquels est suspendu le châssis qui supporte la caisse par l'intermédiaire de la suspension secondaire. Le châssis porte les quatre roues de guidage latéral, les cylindres et la timonerie de frein, les frotteurs de prise et de retour de courant.

Pour des raisons de simplicité de construction et de facilité d'entretien, les bogies des remorques comportent le maximum de pièces communes avec les bogies des motrices, la seule différence importante concernant les essieux.

Les pneus porteurs, à toile métallique, sont du type Michelin Metalic F 16 avec chambre à air (rayon libre 505 mm), ils sont gonflés à l'azote (1) à une pression de 9 bars pour les motrices et 6,5 bars pour les remorques ; leur bande de roulement, de 210 mm de large, est prévue pour permettre une usure de 20 mm avec rechapage.

La roue auxiliaire, qui sert également de tambour de frein, comme il sera dit plus loin, est une roue laminée à voile et jante mince, sa table est usinée cylindriquement et son mentonnet, en raison de son utilisation, est plus saillant que sur le matériel classique (rayon de la table : 0,440 m ; rayon du mentonnet : 0,512 m).

Les pneumatiques de guidage latéral, du type Michelin 600-9x, ont un rayon libre de 0,275 m et sont gonflés à l'azote à la pression de 10 bars.

La structure du bogie a été déterminée d'après l'expérience de l'exploitation de la ligne n° 11 dont le matériel était de deux types de construction différents.

Le châssis de bogie, à longerons intérieurs aux roues, est de construction soudée en éléments caissonnés. Il est suspendu sous les essieux par des blocs en caout-

(1) L'azote est utilisé, au lieu de l'air, pour réduire les chances d'inflammation du caoutchouc en cas de fusion de ce dernier à la suite d'un enrayage accidentel.

chouc, permettant les déplacements relatifs des essieux, et dont l'élasticité s'ajoute à celle des pneumatiques pour constituer la suspension primaire.

La caisse s'appuie sur le bogie par deux patins latéraux dont les supports élastiques (ressorts mixtes acier-caoutchouc) constituent le deuxième étage de suspension à flexibilité variable. Le pivot central ne supporte pas de charge verticale, mais transmet à la caisse les efforts de démarrage et de freinage.

Les déplacements verticaux et de roulis de la caisse par rapport au bogie sont contrôlés par des dispositifs à frottement formant amortisseurs et par une barre antiroulis.

Freinage

Le freinage est obtenu par des sabots, en bois imprégné d'huile, s'appliquant sur les bandages des roues auxiliaires. Le freinage de chaque roue est indépendant : deux sabots sont commandés par un cylindre pneumatique et par une timonerie comprenant un régulateur automatique.

Ce dispositif a été reconnu comme le plus avantageux du point de vue du prix, de l'exploitation et des facilités d'entretien.

L'utilisation du bois huilé (hêtre et huile d'arachide), pratiquée sur le métropolitain depuis longtemps, est très intéressante ; son prix est modique, son usure faible et celle qu'il provoque sur le bandage insensible, il ne donne pas de poussière, enfin son coefficient de frottement est constant jusqu'à l'arrêt, ce qui permet des fins de freinage sans réactions gênantes pour les voyageurs. Il convient toutefois de signaler que le bois huilé ne s'accommoderait pas de voitures trop lourdes, de temps de freinage prolongés et de grandes vitesses.

4 - Les caisses - Construction et aménagements (fig. 7)

L'ossature de la caisse est du type poutre « à revêtement travaillant ». Sa construction est particulièrement étudiée compte tenu de l'importance des ouvertures des baies et des portes, du passage de ces portes à travers les montants qui les encadrent, et de l'encombrement du dessous de châssis par l'appareillage électrique et pneumatique.

Le parquet, du type « sans joint », est constitué par un aggloméré à base de caoutchouc posé directement sur la tôle de platelage à l'état pâteux et dressé par ponçage après durcissement.

Le revêtement intérieur et l'habillage utilisent très largement les plastiques lamifiés de grande dureté, l'acier inoxydable et les alliages légers.

Les sièges sont garnis de coussins et dossiers rembourrés, ils sont complétés par des stapontins nombreux qui, aux heures creuses, permettent de doubler



Fig. 7. — Intérieur d'une voiture sur pneumatiques

le nombre des places assises, et aux heures de pointe donnent aux voitures une très grande capacité.

La ventilation est obtenue par des châssis de baie ouvrants mais surtout par un lanterneau dont les ouvertures latérales sont munies d'aubes directrices qui assurent, sous l'effet de la vitesse, une entrée d'air efficace tout le long du train.

Portes

Les portes coulissantes, dont les vantaux sont conjugués par un mécanisme à vis réversible, ont une ouverture utile de 1,30 m, ouverture permettant le passage de deux personnes de front. Elles comportent une serrure, à leur partie supérieure, mue par une manette à la disposition des voyageurs.

La commande pneumatique de ces portes, qui a déjà été appliquée sur la ligne n° 11, présente des caractéristiques nouvelles :

- la fermeture est commandée pneumatiquement par l'intermédiaire d'une électro-valve placée sur chaque voiture ; cette fermeture s'effectue en deux temps : une approche très rapide suivie par une course terminale lente ;

- l'ouverture est également commandée pneumatiquement par électro-valve, mais elle reste subordon-

née à l'actionnement par les voyageurs de la manette individuelle de la serrure de chaque porte.

Ce système répond à plusieurs critères qui tendent à obtenir à la fois une sécurité très poussée et une réduction des stationnements :

- blocage des portes pendant la marche du train ;
- ouverture, après autorisation par le personnel du train, à la demande du voyageur, permettant une descente rapide dès l'arrêt ;
- ouverture complète et rapide libérant la largeur complète de la porte ;
- fermeture rapide avant le départ.

5 - L'équipement électrique et pneumatique

Commande de frein

La commande de frein est d'un système électropneumatique nouveau, simple et très sûr.

L'air comprimé nécessaire pour l'actionnement des cylindres de frein des bogies est fourni par des compresseurs équipant chaque motrice, mais la commande à partir de la loge de conduite est purement électrique, elle comporte les mêmes sécurités que la commande pneumatique classique « continue » et « automatique ».

L'admission aux cylindres de frein de chaque voiture est commandée localement par une électro-valve modérable Jourdain-Monneret, complétée par un relais pneumatique, qui assure l'admission de pression maximale en cas de manque de courant. La réduction de ce freinage ou sa suppression est obtenue par la mise sous tension par le manipulateur de conduite de plusieurs fils provoquant par des relais locaux l'excitation de l'électro-valve à des tensions variables correspondant aux différentes pressions de freinage : 10 crans de service donnant à charge maximale une décélération de 0 à $1,70 \text{ m/s}^2$, ce qui permet une décélération moyenne de $1,45 \text{ m/s}^2$ pour des arrêts normaux, et un premier cran, dit « cran d'urgence », donnant une décélération de 2 m/s^2 .

Le système permet la mise en œuvre instantanée du frein le long du train, avec modérabilité aussi bien au serrage qu'au desserrage, il permet d'assurer la progressivité nécessaire au confort des voyageurs et une grande précision dans les arrêts en station ; son caractère d'inépuisable est absolu.

Enfin, l'autonomie du freinage est assurée comme avec les systèmes classiques ; de plus, le déblocage ne peut être obtenu en cas d'insuffisance de la pression locale nécessaire pour un freinage ultérieur.

Le manque de courant ou la rupture d'un attelage provoque immédiatement le freinage d'urgence ; le freinage de secours (le plus élevé des crans de service) peut être obtenu également par les voyageurs par actionnement de tirettes de secours.

Équipement de traction

Les moteurs de traction, du type auto-ventilé mais aspirant l'air de refroidissement au travers de filtres, sont montés directement sur les ponts des essieux. Ils fonctionnent chacun sous la demi-tension de la ligne, soit 300 à 360 V. Leur vitesse maximale en service est de 3 550 tr/mn pour 70 km/h, leur puissance continue unitaire est de 140 ch (1) pour 360 V.

L'équipement de traction donne 26 crans de démarrage et de marche : couplages série (quatre moteurs en série) et série-parallèle, trois crans à champ réduit par shuntage semi-inductif des inducteurs.

(1) Cette puissance était de 90 ch sur le matériel de la ligne n° 11 pour lequel la proportion des essieux moteurs était plus forte, cependant le poids de ces nouveaux moteurs n'excède pas de 10 % celui des précédents.

Cet équipement comprend :

- un disjoncteur ;
- des contacteurs et un inverseur mus par un arbre à cames à servo-moteur électrique (système Jeumont-Heidmann) ;
- des contacteurs de shuntage.

La commande de cet équipement, sous l'action du manipulateur de la loge de conduite (qui assure également le freinage électropneumatique), est assurée à basse tension (70 V). Le rythme du passage des crans de démarrage est soumis à un contrôle général chronométrique synchronisé, mis au point par les services de la Régie ; ce contrôle assure le passage des crans suivant un rythme invariable, qui donne une accélération moyenne à peu près indépendante de la charge des véhicules et du profil de la ligne, dans la limite toutefois de l'intensité admissible par les moteurs.

Le démarrage s'effectue avec une accélération de $1,3 \text{ m/s}^2$ jusqu'à 20 km/h environ, l'application de cette accélération s'effectuant de façon progressive — à raison de $0,6 \text{ m/s}^3$ — pour rendre l'importance de cette accélération moins sensible pour les voyageurs. L'accélération de $1,3 \text{ m/s}^2$ est obtenue jusqu'aux trois quarts de la charge maximale normale.

Compresseur

Le groupe moto-compresseur, monté sur chaque motrice, peut débiter 600 l/mn sous 8 bars, il fournit l'air comprimé utilisé principalement pour les freins et la commande des portes. Deux types de pompe ont été retenus, tous deux à deux étages, l'un à quatre cylindres en V, l'autre à deux cylindres en V.

Éclairage

L'éclairage est assuré par tubes fluorescents à allumage instantané, alimentés par le courant continu de traction et montés en série par trois ou par quatre. Un éclairage de secours par ampoules à incandescence, alimenté par les batteries, se substitue automatiquement à l'éclairage normal en cas de manque de tension de traction.

Batteries

L'alimentation à basse tension est faite par des batteries de 50 éléments cadmium-nickel de 35 Ah, à raison d'une batterie par motrice. Chaque batterie est maintenue en charge par un groupe convertisseur tournant auto-régulateur, elle est munie d'un « régulateur de tension distribuée » qui règle celle-ci à 70 V quel que soit l'état de charge de la batterie.

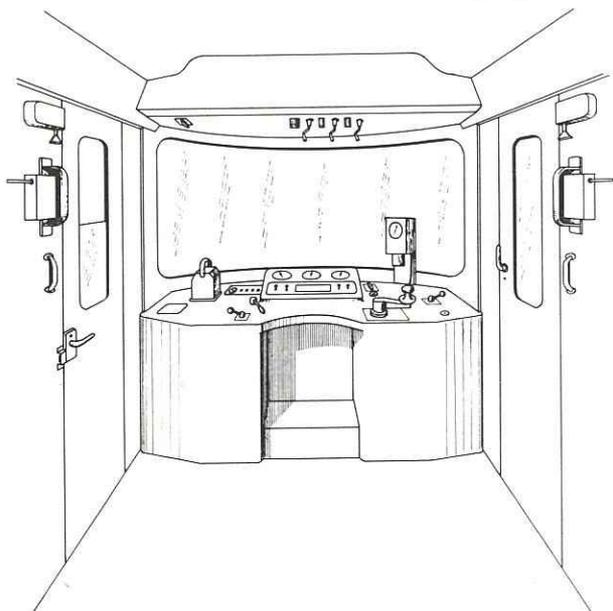


Fig. 8. — Loge de conduite (type ligne n° 1)

Montage des appareils

La plus grande partie de l'appareillage électrique et pneumatique est disposée sous le châssis des caisses. Sa disposition a été étudiée pour faciliter les visites d'entretien et surtout les démontages permettant l'échange standard des ensembles.

Cet échange standard, et celui des bogies, permettent en effet d'assurer la révision des organes suivant le rythme nécessaire sans immobiliser des voitures à l'atelier.

Appareils de conduite et de contrôle

Loge de conduite (fig. 8)

L'appareillage de conduite et de contrôle a été étudié pour faciliter le travail du personnel d'exploitation et réduire les temps morts, qu'il s'agisse des temps de dégarage, de garage, de retournement dans les terminus.

Les commandes des divers appareils sont groupées et enclenchées pour éviter toute fausse manœuvre, qu'il s'agisse des appareils de conduite, groupés dans un pupitre qui occupe tout l'avant de la loge, ou de ceux qui sont à la disposition du chef de train (commande des portes, du signal de départ, de l'éclairage et des feux divers).

Un seul manipulateur de conduite commande les moteurs de traction et le freinage ; un dispositif d'interrupteurs et de voyants lumineux permet au conduc-

teur, à tout moment, de vérifier l'efficacité du freinage et de l'équipement de traction sur tout le train ; en cas d'incident, il permet de localiser rapidement l'organe défectueux.

Un appareil contrôleur de marche, placé dans la loge, enregistre sur une bande, en fonction des déplacements du train, tous les éléments nécessaires pour la vérification de la régularité et de la sécurité de la conduite du train : temps, vitesse, actionnement du signal de départ, franchissement des signaux.

6 - La construction du matériel roulant

Matériel en service sur la ligne n° 11

Le matériel de la ligne n° 11 en service depuis 1956-1957 comprend : 71 voitures — 36 motrices avec loge, 18 motrices intermédiaires et 17 remorques — permettant de former 16 trains de 4 voitures, compte tenu du matériel de réserve.

Ce matériel a été fourni par deux groupes de constructeurs :

Régie Nationale des Usines Renault : bogies, caisses, montage d'ensemble. — Compagnie Électro-Mécanique : moteurs, équipement de contrôle de traction.

Brissonneau et Lotz : caisses, montage d'ensemble. — Alstom : bogies, moteurs. — Jeumont : équipement de contrôle de traction.

Matériel en service sur la ligne n° 1

Le matériel de la ligne n° 1, mis en service depuis 1963, comprend 272 voitures — 92 motrices avec loge, 92 motrices intermédiaires, 88 remorques — permettant de constituer 41 trains de 6 voitures, compte tenu du matériel de réserve.

La fourniture de ce matériel, sur un modèle unique, a été confiée aux constructeurs suivants :

— Compagnie Industrielle de Matériel de Transport : caisses, bogies, montage d'ensemble.

— Alstom et Compagnie Électro-Mécanique : moteurs de traction.

— Jeumont : équipement de contrôle de traction.



50 349

