

LE MATÉRIEL ROULANT DU MÉTRO DE PARIS

Réalisations et perspectives d'avenir

Pierre FAUCHEUX

*Chef du Service du Matériel roulant
Réseau Ferré de la Régie Autonome
des Transports Parisiens*

2670

La Revue Générale des Chemins de fer
paraît mensuellement depuis juillet 1878
sous le patronage et avec la collaboration d'un
COMITÉ DE RÉDACTION

composé actuellement de :

MM.

BOYAUX, Directeur Général honoraire de la S.N.C.F.
DINE, Directeur du Réseau du Sud-Est de la S.N.C.F.
DUPUY, Directeur du Matériel de la S.N.C.F.
FONTGALLAND (de), Secrétaire Général de l'Union Internationale des
Chemins de fer

GEAIS, Directeur du Réseau du Nord de la S.N.C.F.
GENTIL, Directeur Général Adjoint de la S.N.C.F.
GUIBERT, Directeur Général de la S.N.C.F.
HUTTER, Directeur Général adjoint de la S.N.C.F.
LACOSTE, Directeur Commercial de la S.N.C.F.
LECLERC du SABLON, Directeur du Transport de la S.N.C.F.
LEGRAND, Directeur de l'Équipement de la S.N.C.F.
LOZÉ, Directeur du Réseau du Sud-Ouest de la S.N.C.F.
MONNET, Directeur des Études Générales de la S.N.C.F.
PONCET, Directeur honoraire de la S.N.C.F.
Président honoraire du Comité de Rédaction

RAVENET, Directeur du Réseau de l'Ouest de la S.N.C.F.
STEIN, Directeur Général adjoint de la S.N.C.F.
TESSIER, Chef du Service de la Recherche de la S.N.C.F.
TOUCHOT, Directeur du Réseau de l'Est de la S.N.C.F.

GARREAU, Directeur honoraire de la S.N.C.F.
PRÉSIDENT

Siège du Comité : 20, Boulevard Diderot, PARIS

Secrétaire Général :

MOUSTARDIER, Ingénieur en Chef honoraire de la S.N.C.F.

BUT de la REVUE GÉNÉRALE DES CHEMINS DE FER

La Revue Générale des Chemins de fer rassemble toutes les documentations qui touchent à l'industrie des Chemins de fer. Elle est destinée à tenir ceux qui s'occupent de ces importantes questions au courant des travaux exécutés, des progrès tentés ou réalisés et, en général, de tous faits techniques ou commerciaux qui, en France ou à l'Étranger, présentent quelque intérêt.

Elle publie des notes originales relatives à la construction des chemins de fer, à leur entretien, à l'établissement et aux essais du matériel fixe et roulant, à la traction, etc., des études économiques ou financières, des documents ayant trait à l'exploitation technique et commerciale, des statistiques, des arrêts de jurisprudence, etc.

Elle insère dans la dernière livraison de chaque année une table des matières indexée suivant les principes de la classification décimale.

LE MATÉRIEL ROULANT DU MÉTRO DE PARIS

Réalisations et perspectives d'avenir

Pierre FAUCHEUX

*Chef du Service du Matériel roulant
Réseau Ferré de la Régie Autonome
des Transports Parisiens*

Avant d'examiner les réalisations « matériel roulant » du métro de Paris et d'esquisser ses perspectives d'avenir, il n'est sans doute pas inutile de donner quelques indications sur ce qu'attendent, dans ce domaine, le voyageur et la collectivité. Les éléments qui s'en dégagent sont souvent contradictoires, ils permettent néanmoins de mieux saisir ou du moins d'explicitier les lignes directrices de notre action.

Que demande le voyageur ?

- a) être transporté de son point de départ à son point d'arrivée sans rupture de charge ou du moins avec le minimum de rupture de charge.

Quelles que soient les raisons économiques ou historiques qui justifient ces ruptures de charge, elles sont toujours terriblement ressenties par le voyageur. L'aménagement des stations par la mécanisation des escaliers en particulier, l'augmentation des fréquences de passage, qui permet de ne pas prolonger l'attente, ne constituent trop souvent que des palliatifs, sans apporter d'améliorations fondamentales. La voiture particulière, polluante et coûteuse pour la collectivité et l'utilisateur, répond parfaitement au besoin de la liaison directe...

pour autant, bien sûr, que soient résolus les problèmes de parking.

Quel axe de recherche peut-on, à l'égard de ce désir, déduire pour notre matériel roulant ?

Il faut avouer que dans le cadre des infrastructures traditionnelles qui continuent d'ailleurs à être adoptées sur les réseaux les plus récents, il est difficile de répondre à cette exigence. Le métro est un moyen puissant qui permet les forts débits mais, en contrepartie de cette capacité, il est rigide. Il ne peut guère s'adapter à la demande individuelle, sinon par la globalisation des besoins particuliers.

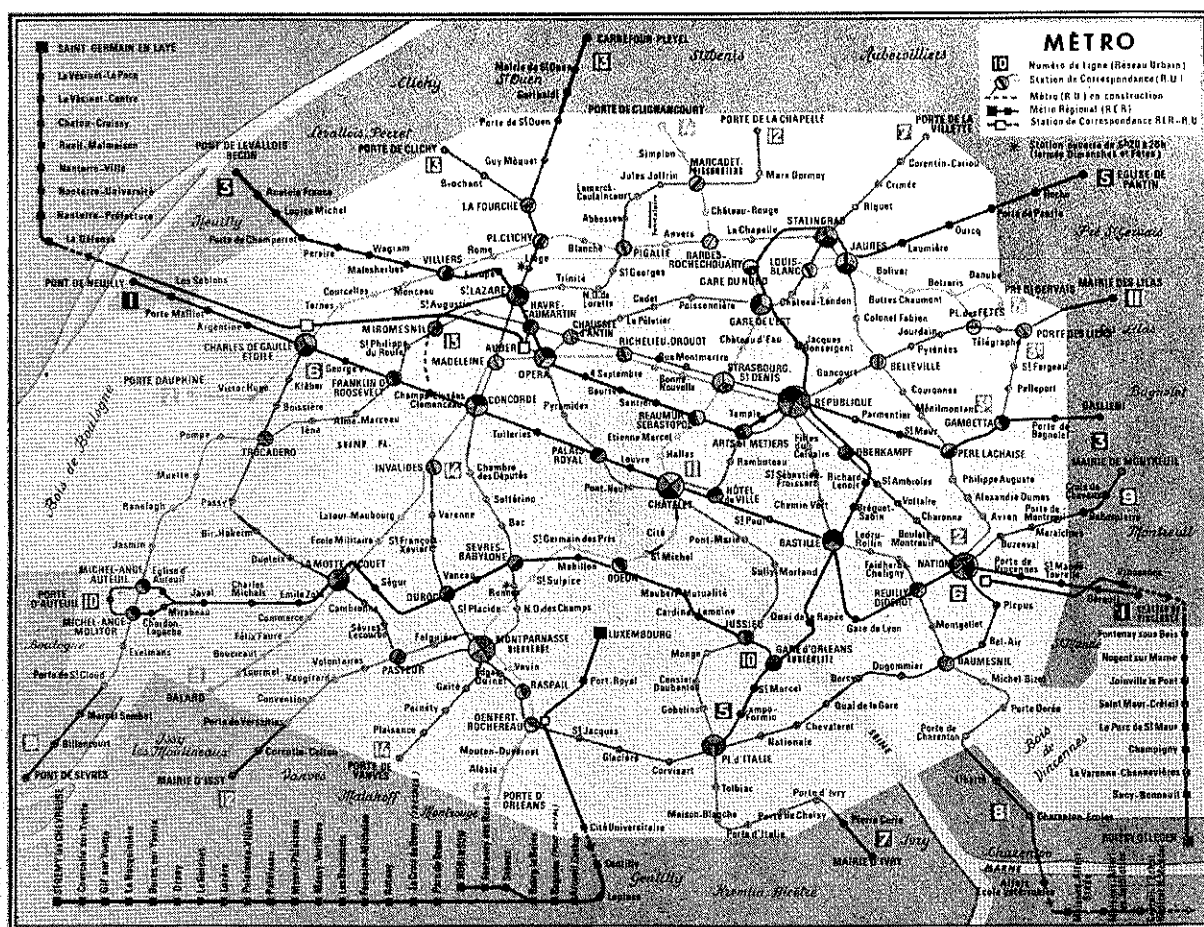
Des études sont en cours tant en France qu'à l'étranger pour tenter de résoudre ce problème. Les possibilités offertes par les techniques d'automatisation, de programmation et de télétransmission ouvrent des perspectives nouvelles, mais, actuellement, ces études n'ont pas acquis « droit de cité » tant sur le plan technique que sur le plan économique.

- b) être transporté vite

Ce désir impose un minimum d'attente et une bonne vitesse commerciale. Le premier paramètre, attente minimale, est lié à l'intervalle réalisable.

Fig. 1 — Carte du réseau urbain de Paris

Le réseau urbain de Paris date du début du siècle. Ses deux caractéristiques essentielles sont, d'une part, sa limitation au Paris intra-muros, d'autre part, à l'intérieur des mêmes limites, un maillage très dense. L'évolution dans les prochaines années portera essentiellement sur des prolongements en banlieue, dont certains sont déjà en cours d'exécution, et la jonction des lignes 13 et 14 pour assurer une transversale Nord-Sud.



Plus on souhaitera un intervalle court, plus on devra s'orienter vers un matériel performant, à hautes caractéristiques au démarrage et au freinage. Ce sera la participation du matériel roulant à la résolution de ce problème qui conduit, par ailleurs, à la recherche de solutions nouvelles pour la signalisation et à la limitation des temps de stationnement. Le second paramètre, vitesse commerciale élevée, sur une ligne à interstation courte comme c'est le cas de toutes nos lignes à Paris, conduit, lui aussi, à la recherche de solutions permettant des taux élevés d'accélération et de freinage.

Il est intuitif qu'il serait vain, sur un réseau de métro, de sacrifier ces caractéristiques à une vitesse de pointe plus élevée, que l'on n'atteindrait jamais. On voit donc se dessiner l'orientation vers un matériel à hautes performances au démarrage et au freinage, pour lequel la vitesse de pointe constituera un paramètre accessoire, qui en tout état de cause, ne devra jamais venir réduire les caractéristiques au démarrage et au freinage. Le matériel sur pneumatiques, magistralement développé sur le réseau de Paris, s'inscrit dans le cadre de cette recherche.

c) trouver, pendant son trajet dans la voiture de métro, un bon niveau de confort.

Il ne faut pas, dans l'examen de ce facteur, oublier que les durées de trajet pratiquées sur notre réseau sont toujours très faibles : 10, 20, au maximum 30 minutes, et que les solutions à élaborer n'ont rien de commun avec celles qui s'imposent à la S.N.C.F. pour des trajets de longue durée.

Essayons de voir plus clair dans cette notion de confort :

- le premier souhait est d'être assis même si le confort du siège ne vaut pas celui d'un « fauteuil club ». En première analyse, le confort d'un siège est lié à ses dimensions; le diagramme d'une voiture de métro sera donc un compromis entre le confort individuel du siège et la satisfaction du plus grand nombre;
- dans le cas où le voyageur ne peut être assis il souhaite trouver, debout, une place « honnête » lui permettant, même au prix de quelques acrobaties, de déplier son journal. La réponse à cette préoccupation réside, essentiellement, à l'heure

de pointe, dans le resserrement de l'intervalle, question que nous avons déjà esquissée plus haut. Pour le matériel roulant, à l'échelon du diagramme de la voiture, constatons simplement que cette exigence est contradictoire avec la précédente. Les solutions apportées par les divers réseaux sont variées : à Paris nous avons développé des strapontins, à Tokyo il est prévu des sièges longitudinaux qui sacrifient l'heureux voyageur assis à la majorité de ceux qui sont contraints de rester debout;

— le confort implique aussi une ambiance agréable touchant :

— *la ventilation*

dans ce domaine, compte tenu des densités d'occupation, il faut des débits importants de ventilation. Nous expérimentons actuellement des voitures prototypes avec ventilation réfrigérée; la généralisation de cette technique aux matériels de série poserait des problèmes techniques et encore plus financiers;

— *l'éclairage*

de tous les problèmes auxquels nous sommes confrontés c'est certainement l'un des plus faciles et il peut être considéré comme résolu, encore qu'avec notre gabarit étroit qui place les appareils d'éclairage au niveau des yeux des voyageurs debout, il y ait place pour une recherche de solutions évitant l'éblouissement;

— *le cadre et la décoration*

des efforts importants sont actuellement déployés pour rechercher ce qui peut satisfaire au mieux nos voyageurs;

— *la qualité de roulement,*

— *le silence.*

d) ne pas subir de retards et, dans le cas où il s'en produit, être « pénalisé » le moins possible.

Pour le matériel roulant ceci implique, bien sûr, un matériel fiable, donc relativement simple et rustique. Ceci implique aussi un matériel surpuissant, peu sensible à l'incident. Le trafic métro s'apparente à une gigantesque noria, et un incident sur un seul des éléments, le train, risque sinon de bloquer, au moins de perturber toute la ligne. Pour résoudre au mieux un incident il faudra, de plus, des liaisons et des télé-transmissions entre un poste central de commande (PCC) et chaque train.

La régularité de l'exploitation, en dehors des incidents majeurs, débouche sur la régulation du trafic qui, compte tenu des réserves de temps très faibles que nous adoptons pour resserrer les inter-

valles, ne peut être obtenue que par un automatisme d'exploitation entraînant, au niveau du matériel roulant, un automatisme portant sur la conduite, la fermeture des portes et d'une façon plus générale, le service en station, etc...

Ainsi, si l'on ne prenait en compte que les désirs de nos voyageurs, en tant que clients, qui rejoignent d'ailleurs souvent ceux des ingénieurs, on verrait s'esquisser un matériel à hautes performances, à adhérence totale, très automatisé, bien suspendu et sans doute à ventilation réfrigérée. On conçoit que le coût d'un tel matériel serait élevé et c'est là qu'intervient l'autre « face » de notre clientèle qui, si elle emprunte notre métro, n'en oublie pas pour autant que, sous une forme ou sous une autre, elle participe à l'achat de notre matériel, en acquittant le prix du billet ou... ses impôts. L'expérience a montré et continue de montrer qu'aucun réseau de grande ville, compte tenu de l'ampleur des investissements à réaliser, n'échappe à la nécessité d'obtenir un appui financier de la puissance publique.

Que demande la puissance publique ? Elle exige que les investissements soient valables sur le plan technique mais aussi qu'ils soient harmonieux et équilibrés au plan économique, dans le sens le plus large de ce terme. A quoi servirait d'avoir les voitures les plus luxueuses si par ailleurs on ne pouvait dégager aucun crédit pour les stations ou si l'on devait renoncer aux indispensables travaux correspondant à des prolongements de lignes et à l'établissement de nouvelles liaisons ?

On sera donc conduit, pour le matériel roulant, comme en toutes choses, à élaborer un compromis entre la technique dont les exigences conduiraient à des dépenses élevées, et les facteurs économiques qui apportent un frein à ces ambitions.

Dans le cas précis du métro de Paris, n'oublions pas enfin que nous sommes obligés d'utiliser l'infrastructure existante.

Sur l'ensemble de ces données, on peut tenter de définir le meilleur compromis pour le réseau urbain du métro parisien :

- bonnes performances d'accélération et de freinage,
- vitesse maximale limitée à 80 ou 100 km/h, selon que le matériel sera utilisé exclusivement sur des lignes urbaines à très courtes interstations ou sera éventuellement en service sur des prolongements de banlieue, où la distance entre station sera plus élevée,
- matériel légèrement surpuissant afin que l'incident « banal », le plus fréquent, n'entraîne qu'une perturbation négligeable. Pour des motifs d'ordre

économique on s'abstiendra de rechercher un matériel capable d'« effacer » l'incident à faible probabilité,

- matériel fiable,
- coût d'entretien réduit,
- matériel endurant prévu pour une durée de vie de 20 à 30 ans, mais capable d'assurer son service au-delà de ce délai si les circonstances l'imposent. On admettra, dans cette hypothèse, le changement de certains organes ou équipements, sans toutefois que cette mesure porte sur les éléments principaux, bogie par exemple,
- matériel « non polluant », au sens le plus large du terme : bonne insertion dans l'environnement (bruit, vibrations, etc...),
- matériel confortable. Les limitations dans la recherche correspondante résultent, là encore, de contraintes économiques.

*
* *

Ayant ainsi défini quelles sont les orientations qui nous paraissent devoir se dégager d'une étude correspondant à la satisfaction des besoins, nous sommes bien obligés de reconnaître que, sur le réseau de Paris, celui qui nous intéresse dans cet exposé, nous sommes presque toujours confrontés à des contraintes qui résultent du fait que toute nouvelle étude, tout nouveau matériel doit s'intégrer dans le cadre du réseau existant. Pour le matériel urbain à petit gabarit, pour les prolongements de ligne essentiellement, il est exclu de concevoir, même si nous en avons le désir, un matériel qui ne serait pas capable d'emprunter l'infrastructure existante. Toute autre solution multiplierait les types de matériel et, par là, conduirait à des coûts de développement, de mise au point et d'entretien prohibitifs. Inconvénient encore plus grave, la diversité du matériel conduirait à « figer » le réseau, sinon ligne par ligne, tout au moins par groupes de lignes, ce qui exclurait, dans l'avenir, toute possibilité d'adaptation à l'évolution du trafic. Or on sait que, quels que soient les moyens mis en œuvre pour prédire l'avenir, celui-ci ne cadrera jamais avec la prévision.

Ce facteur qui, bien souvent, est oublié par ceux, d'ailleurs rares et mal informés, qui nous reprochent notre manque d'imagination, nous impose, pour les véhicules du réseau urbain, d'accepter comme une donnée :

- les caractéristiques géométriques des voitures et, par conséquent, en fait, le diagramme et la hauteur de plancher,

- les caractéristiques de la captation des courants (frotteur, tension d'alimentation...)
- les débattements caisses — bogies correspondant aux courbes les plus sévères du réseau ⁽¹⁾. Cet élément peut paraître secondaire alors qu'en fait, il nous conduit à écarter certaines solutions technologiques qui peuvent être adaptées sur des réseaux neufs.

Sur le métro régional nous ne nous sommes pas heurtés aux mêmes contraintes et nous avons pu développer plus librement nos études.

*
* *

Le métro parisien comprend deux catégories de matériels nettement différenciés :

- le matériel petit gabarit du réseau urbain,
- le matériel grand gabarit du réseau régional.

LE MATÉRIEL DU RÉSEAU URBAIN

Jusqu'à la dernière guerre mondiale le parc du réseau s'est caractérisé par une grande standardisation correspondant au vieux matériel « Sprague », bien connu de tous. C'est un matériel très réussi qui fait honneur à ceux qui l'ont conçu; robuste et simple il a pu assurer, sans défaillance, un service plus que sévère pendant la deuxième guerre mondiale et les années d'après guerre. Cet hommage mérité lui étant rendu, on ne peut que regretter qu'il continue encore à circuler sur nos lignes. Il est bien évident qu'il appartient à une autre époque et qu'il est mal adapté à nos impératifs actuels, en particulier dans le domaine de l'automatisme et de la régulation. Son remplacement est largement entamé et nous espérons que, d'ici quelques années, il ira définitivement prendre la place d'honneur qui lui revient au musée des transports.

Matériel articulé

Immédiatement après la guerre, la Régie a lancé un programme de matériel articulé par éléments couplables (3 caisses - 4 bogies). On attendait de cette formule, utilisée à Hambourg, une économie, en par-

(1) La courbe la plus sévère du réseau urbain se trouve à la station « Bastille » sur la ligne n° 1. Son rayon est de 37 m. Il avait été envisagé de remodeler cette station pour supprimer ce point singulier, mais finalement on a renoncé à cette opération compte tenu du coût des travaux, des incidences sur la voirie et l'exploitation de la ligne. D'ailleurs il aurait fallu, pour franchir une étape significative et porter le rayon nominal à 65 m, non seulement traiter Bastille, mais aussi beaucoup d'autres points du réseau, hypothèse défendable sur le plan technique mais que des impératifs économiques conduisent à rejeter.

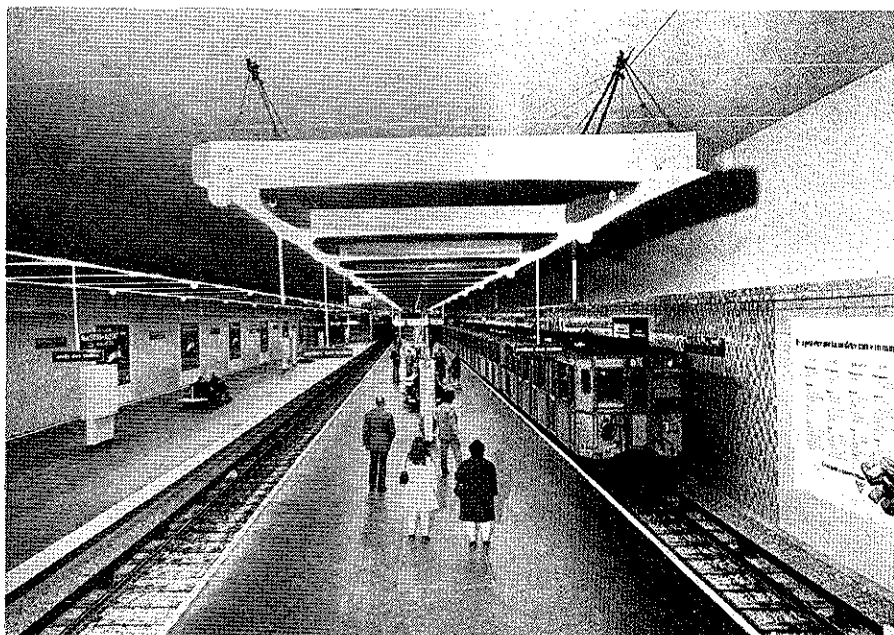


Fig. 2 — Matériel Sprague

Le réseau urbain de Paris comporte encore 1975 voitures de ce type en service pour un parc total de 3 840 voitures. Les programmes de modernisation prévoient la réforme des dernières voitures de ce type vers 1980. Le matériel Sprague est robuste et simple. Il a assuré et continue à assurer, sur les lignes non encore modernisées, un service sans défaillance.

ticulier par la possibilité d'adapter le nombre d'éléments en circulation à la demande exacte du trafic.

Dans les conditions d'utilisation sur le réseau urbain de Paris, où les dispositions des terminus de lignes en tunnel ne facilitent pas les opérations d'accouplement et de découplément, les espoirs mis dans ce type de matériel n'ont pas été confirmés par l'expérience. Aussi, après l'équipement de la ligne 13, la Régie décidait vers 1950-1955 de renoncer à cette formule et accentuait son effort dans la mise au point du matériel sur pneumatiques. Cet abandon ne correspond pas à un jugement absolu sur la validité de la formule qui, dans d'autres conditions d'implantation des voies et d'aménagement des terminus, peut se révéler bénéfique.

Matériel sur pneumatiques

Je ne décrirai pas le principe du matériel sur pneumatiques développé par la R.A.T.P. car je suppose qu'il est déjà bien connu de tous les lecteurs de la Revue Générale des Chemins de Fer ⁽¹⁾. Je voudrais simplement, à la lumière de l'expérience acquise par la Régie ces dernières années, tant sur le réseau de Paris que sur les réseaux étrangers où la technique « pneu » a été adoptée (Montréal et Mexico, pour ne

(¹) Voir notamment: R.G.C.F. de mai 1963 p. 308 — Présentation du premier exemplaire des nouvelles rames sur pneumatiques destinées à la ligne n° 1 du métropolitain de Paris, et R.G.C.F. de décembre 1964 p. 725 — L'évolution du matériel roulant du métropolitain de Paris depuis l'origine du réseau.

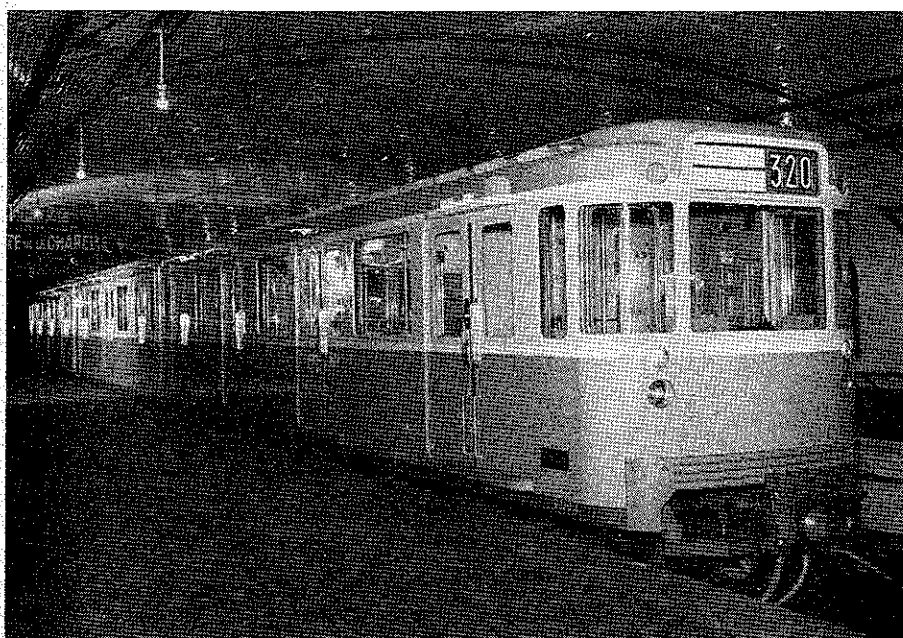


Fig. 3 — Matériel articulé

Ce matériel a été conçu et mis en service après la guerre 1939-1945. Ce matériel donne satisfaction mais la formule par éléments articulés couplables n'a pas été retenue pour la poursuite de la modernisation. Il est actuellement en service sur la ligne n° 13 et sera transféré à partir de 1975 sur la ligne n° 10, après avoir été modernisé.

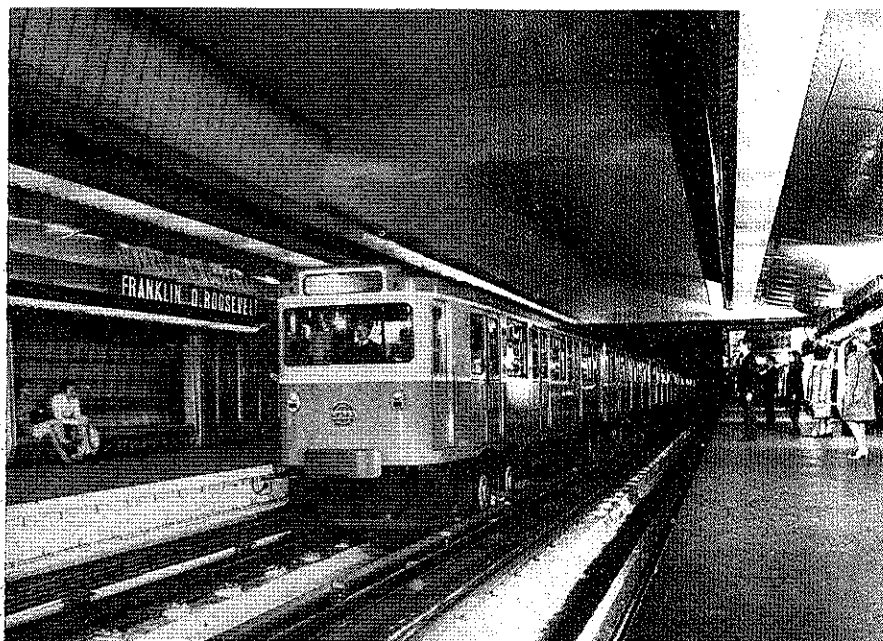


Fig. 4 — Matériel sur pneumatiques

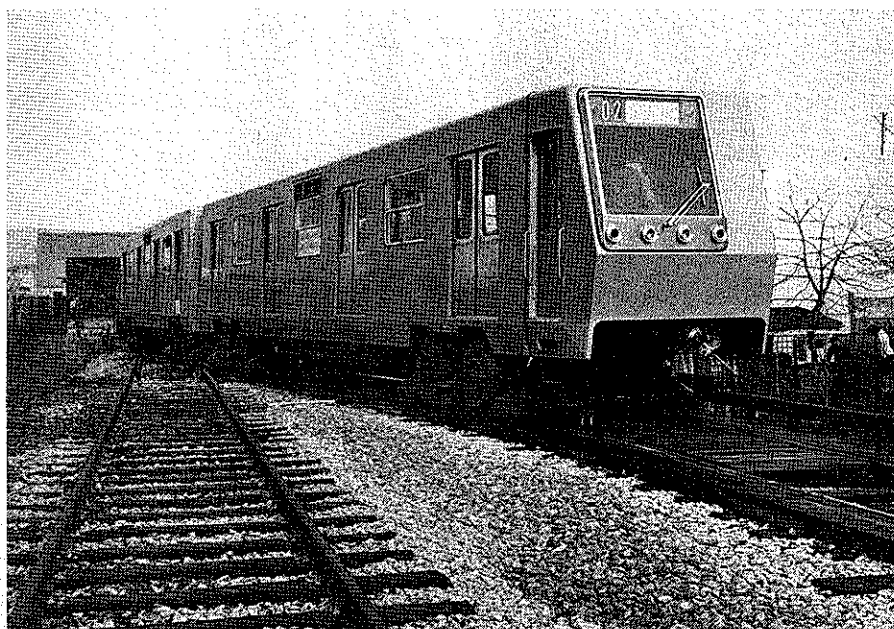
Ce matériel, dont les premières études remontent aux années 1950, équipe à Paris les lignes n°s 11, 1 et 4. A partir de l'été 1974, il équipera la ligne n° 6.

Performant et fiable, c'est un excellent matériel bien adapté à la desserte des zones fortement urbanisées. Il a été choisi pour l'équipement des réseaux de Montréal, Mexico (photo ci-dessous) et Santiago à l'Étranger.

Il a été adopté, après études, pour les villes de Lyon et Marseille en France.

citer que les réseaux effectivement en service depuis plusieurs années), dresser un tableau, tel qu'il se dégage actuellement, des avantages et des inconvénients de cette technique comparée à la technique moderne du roulement fer. Jusqu'à ces dernières années une telle comparaison nous était difficile à établir puisque la Régie ne disposait pas, sur son propre réseau, de matériel « fer » moderne. Bien sûr, nous pouvions disposer d'éléments concernant les réalisations étrangères, mais outre le fait qu'ils étaient fragmentaires, nous n'avions pas pu, jusqu'à une date récente, recueillir des éléments précis sur les mêmes voies, dans les mêmes conditions d'exploitation.

Rappelons que la Régie, après étude et mise au point d'un prototype, devait équiper, dans un premier temps, la ligne 11 à titre expérimental. Au vu des résultats satisfaisants obtenus, qui confirmaient presque en tous points les espoirs fondés sur ce type de matériel, la Régie décidait d'équiper les 2 lignes de son réseau les plus chargées, la ligne 1 (1962) et la ligne 4 (1966). Toutes ces lignes, à l'exception de la station Bastille de la ligne 1, étaient entièrement en tunnel. En 1971, la Régie franchissait une nouvelle étape en lançant la modernisation avec du matériel sur pneumatiques de la ligne 6, dont une partie



importante comporte des viaducs aériens. Cette modernisation est en cours, elle oblige à une modification des voies; la mise en service avec le nouveau parc interviendra au cours de la seconde moitié de l'année 1974.

Le matériel sur pneumatiques présente, à mon avis, quatre avantages principaux :

a) Le matériel sur pneus est silencieux et induit dans la structure, un niveau de vibrations très faible. Sur ce premier point, le silence, la synthèse de toutes les mesures que nous avons faites nous permet d'affirmer que, toutes choses égales par ailleurs, le niveau de bruit de roulement obtenu avec un matériel sur pneus est inférieur de 6 à 7 dBA, en moyenne,

à celui d'un matériel fer équivalent, utilisé dans les mêmes conditions. Une telle affirmation qui résulte du dépouillement de tout un ensemble de mesures, n'est nullement en contradiction avec le fait que certaines réalisations étrangères, allemandes en particulier, utilisant le roulement fer, sont remarquables sur le plan du silence. Il ne faut pas oublier que le bruit de roulement ne constitue que l'un des nombreux facteurs qui déterminent le niveau de bruit global. La transparence et l'isolation phonique de la caisse, la réverbération de la structure interviennent de façon déterminante. Sur le second point, vibrations induites, le matériel sur pneumatiques marque une supériorité écrasante et indiscutable. Nous avons procédé sur une même portion de voies à des analyses systématiques et nous pouvons schématiser en indiquant que le rapport des niveaux de vibrations est égal à 20 dB environ. C'est le jour et la nuit. A l'heure où l'on attache, à juste raison, une importance de plus en plus grande à la qualité de vie, dont le silence est l'un des aspects fondamentaux, ce facteur, à lui seul, pour certains projets, conduirait à choisir le matériel sur pneumatiques.

b) La solution de matériel sur pneumatiques, développée par la R.A.T.P., à l'inverse des tentatives de même nature faites à l'étranger, présente la très grande originalité et le mérite d'avoir su marier une idée neuve, l'utilisation du pneumatique sur piste, à l'acquit technique du roulement fer. Ceci apparaît, en particulier, dans l'aiguille, qui dans la solution pneu type Paris, reproduit la belle simplicité fonctionnelle et technologique de l'aiguille classique, résultat de longues mises au point, étalées sur plus d'un siècle.

c) L'adhérence du pneumatique en tunnel, sur piste, se situe à un niveau tel qu'elle ne constitue plus un facteur limitatif pour l'ingénieur chargé du projet. Les autres limitations : confort des voyageurs, puissance disponible à la transmission ..., apparaissent bien avant. Cet avantage permet de resserrer les intervalles, donc d'augmenter le débit de la ligne.

d) Conséquence de l'adhérence — on peut, à égalité de performance au démarrage, prévoir avec un matériel sur pneumatiques une formation de train comportant un pourcentage plus important de remorques, donc plus léger. Notre expérience nous montre qu'il en résulte une économie de l'ordre de 10 % tant sur le coût d'achat que sur celui d'entretien.

Face à ces avantages, il ne faut pas cacher certaines limitations et certains inconvénients.

a) La résistance au roulement du pneu, tout au moins dans les gammes de vitesses pratiquées sur le

métro parisien, est supérieure à celle d'un matériel fer (11 kg/t au lieu de 4,5 kg/t). Ceci ne constitue réellement un inconvénient que pour autant que, dans le bilan énergétique d'ensemble, la résistance de roulement joue un rôle prépondérant. Ce serait le cas d'un trafic type S.N.C.F., pour lequel le maintien à vitesse constante est le régime normal. Par contre, pour des interstations courtes, l'énergie dépensée est en quasi-totalité consacrée à vaincre les forces d'inertie au démarrage et sa valeur dépend des masses à mettre en mouvement. Nous avons vu précédemment que, grâce à son adhérence, le matériel sur pneu, à égalité de performances, pouvait admettre un pourcentage plus important de remorques, il est donc, au total, plus léger. Ceci permet de saisir intuitivement les résultats du calcul, confirmés par l'expérience, qui indiquent :

- que pour des interstations supérieures à 1 200 m, le matériel fer consomme moins,
- que pour des interstations inférieures à 1 200 m, le matériel sur pneumatiques est plus économique.

b) Notre expérience de l'utilisation du pneumatique est limitée à des vitesses maximales de 80 km/h. Nous avons le sentiment que cette technique pourrait, sans inconvénient, être poussée jusqu'à 100 km/h. Par contre, au-delà de cette vitesse qui correspond d'ailleurs nécessairement à des interstations supérieures à 1 500 m, nous ne pensons pas que le pneu apporterait une solution équilibrée.

c) Les contraintes de charge par essieu sont plus restrictives pour le matériel pneu que pour le matériel fer. Dans l'état actuel de la technique des pneumatiques, seules les voitures petit gabarit sont pratiquement justiciables de cette technique, tout au moins dans la ligne des solutions techniques développées jusqu'à maintenant.

d) Les conditions d'adhérence sont actuellement bien expérimentées pour les circulations en tunnel et les circulations à l'air libre sur piste mouillée (ligne 2 du réseau de Mexico). Par contre, pour les circulations extérieures, sous des climats comportant neige et verglas, notre expérience, en service, est encore très limitée. Nous avons étudié ces problèmes sur la base expérimentale de Sucy et développé des solutions qui seront appliquées pour la première fois sur la ligne 6. Nous avons bon espoir d'arriver à une solution technique satisfaisante, mais nous ne cachons pas que ce sera sans doute au prix d'équipements plus complexes et par conséquent plus coûteux que ceux qui seraient utilisés pour des matériels fer. Seule, la prochaine expérience que nous acquerrons sur la ligne 6, en service, nous permettra de porter un jugement sérieux.

Au regard de ces différents facteurs, quelles conclusions pouvons-nous dégager ?

La première conclusion — elle est évidente, mais sans doute il n'est pas inutile de la mettre en lumière — est qu'il n'existe pas un matériel universel qui s'impose comme le meilleur, quelle que soit la nature du problème à résoudre. Chaque réseau a ses particularités, liées à la nature du sol, à l'urbanisme, à l'environnement, au coût relatif de la main-d'œuvre, de l'énergie, etc... et seule une étude d'optimisation, réseau par réseau, permettra de définir le matériel le mieux adapté. Sous cette réserve, il apparaît clairement que le matériel sur pneumatiques est le matériel idéal pour la desserte de zones fortement urbanisées caractérisées par :

- des interstations courtes,
- la nécessité de prévoir des circulations en tunnel, ce qui conduit à préférer le petit gabarit compte tenu du coût des ouvrages,
- le désir de diminuer au maximum les nuisances, acoustiques principalement, tant pour les voyageurs que pour les riverains.

Pour un réseau neuf, on peut mettre à profit les qualités d'adhérence du pneu pour concevoir un tracé économique qui, se « glissera » sans inconvénient à fleur de terre et qui pourra comporter des rampes importantes, s'adaptant au profil du terrain.

Les conditions dans lesquelles le matériel sur pneumatiques s'impose sont celles du réseau parisien, en dehors du fait qu'il ne s'agit pas d'un réseau neuf où, par conséquent, on ne pourra pas tirer l'ultime parti de cette technique. On peut alors s'interroger de façon très fondée sur les raisons qui ont conduit la Régie après une faveur justifiée pour le matériel sur pneumatiques, à développer, en parallèle, un matériel classique à roulement fer dit « fer moderne ».

La réponse à cette interrogation se trouve encore dans les contraintes imposées par le fait que le réseau parisien est un vieux métro qu'il faut transformer et rajeunir. Pour passer du roulement fer au roulement pneu, il faut procéder à des travaux de voie, essentiellement pose de pistes, de barres de guidage et d'alimentation, modification de la hauteur des quais... Tout cela ne pose pas de problème technique difficile et si nous pouvions fermer complètement la ligne pendant l'exécution des travaux, ce programme serait réalisé dans des délais courts (quelques mois) et dans des conditions économiques satisfaisantes. Mais on imagine mal à Paris avec notre réseau saturé à l'heure de pointe, un communiqué annonçant laconiquement que telle ligne est fermée pour plusieurs semaines, aux fins de modernisation.

Une telle éventualité ne pourrait être acceptée par la population parisienne que s'il était clairement établi que cette solution est la seule possible techniquement. Pour transformer une voie fer en voie pneu, il existe une autre solution qui consiste à travailler uniquement de nuit de 1 h 30 à 5 heures. On se représente mal, à priori, toutes les sujétions qu'un tel horaire, marié avec la nécessité de maintenir la ligne ouverte au trafic, implique. Il faut, chaque matin, bien avant 5 heures, prendre toutes dispositions pour que le trafic soit acheminé dès prise de service et le lendemain à fin de service « relancer le chantier » en mettant en place tout ce que l'on a dû ranger la veille. Finalement, la durée du travail efficace, malgré toutes les astuces que l'on peut déployer dans son organisation, est bien réduite. On se rend compte que sur de telles données la « mise sur pneumatiques » d'une ligne du réseau parisien nécessite un délai long et coûte cher. C'est bien ce que m'a montré l'expérience passée des lignes 1 et 4 et celle en cours de la ligne 6.

Dans un bilan d'ensemble, la R.A.T.P. a donc décidé de limiter la modernisation avec matériel sur pneumatiques aux lignes où l'adoption de cette technique apporte des avantages déterminants, soit parce que la charge de la ligne à l'heure de pointe est élevée et nécessite le recours à des intervalles de plus en plus faibles (cas des lignes 1 et 4), soit parce que le tracé et la structure de la ligne sont tels que l'adoption de la technique pneu apporte une amélioration décisive dans le domaine des nuisances aux riverains (cas de la ligne 6 en cours de transformation et, dans l'avenir, à une date non encore fixée, de la ligne 2). Cette position restrictive pour le réseau de Paris, nous en avons vu les raisons, ne doit pas faire oublier, dans les limites précédemment indiquées, les avantages du matériel sur pneumatiques dont l'adoption sur un réseau neuf à construire, ne se heurte pas aux difficultés que nous trouvons à Paris. Nous avons recommandé ce matériel à Lyon et Marseille qui, après étude, ont décidé de l'adopter; de même les réseaux de Montréal, Mexico et Santiago, dont nous avons assuré, ou dont nous assurons l'engineering, sont ou seront équipés de matériels sur pneumatiques. L'expérience, acquise sur les deux réseaux actuellement en service (Montréal et Mexico), montre que notre recommandation était saine, nous n'en voulons pour preuve que les extensions importantes que ces deux réseaux lancent actuellement.

A une époque où la qualité de vie et la réduction des nuisances sont à l'ordre du jour, la technique pneu connaît une faveur justifiée. En dehors des réseaux qui ont adopté la technique Paris et cités précédemment, on assiste à des recherches et des réalisations tant

en France qu'à l'étranger (système VAL à Lille, Sapporo au Japon, Stradaguidata en Italie ...). On peut prévoir pour cette technique, dans l'avenir, une percée et un très large champ d'application. C'est un domaine dans lequel la R.A.T.P. a pris une position de « leader » incontestable et entend bien la conserver.

Matériel fer moderne

La R.A.T.P. a développé depuis 1964-1965 une nouvelle génération de matériel urbain à petit gabarit et à roulement classique pour pouvoir adopter une cadence de modernisation que n'aurait pas permis l'extension à toutes les lignes du réseau de Paris, de la technique sur pneumatiques.

Là non plus, je ne décrirai pas ces différents matériels, car l'énumération serait fastidieuse. En effet dans un premier temps, nous avons expérimenté, après un examen préalable, plusieurs formules. Nous avons fait réaliser un train en acier inoxydable et deux trains à structure de caisses en aluminium correspondant à deux techniques différentes.

Notre effort de recherches a également été axé sur les bogies. Dans un premier temps, nous avons équipé la ligne 3 avec des bogies monomoteurs et la ligne 7 avec des bogies bimoteurs — simultanément nous avons expérimenté 4 types de bogies monomoteurs prototypes, sorte de concours ouvert à l'industrie française.

Plutôt qu'un descriptif qui déborderait le cadre de cet article, je chercherai à dégager quelques idées générales et les orientations que nous retenons actuellement.

a) A l'origine nous avons opté pour l'adhérence totale. C'est évidemment une solution idéale tant pour le technicien que pour l'exploitant. Son seul défaut est son coût, tant à l'achat qu'à l'entretien. Aussi, dans un désir d'optimiser les investissements à volume total donné, la R.A.T.P. a décidé de revenir à l'adhérence partielle. Pour des trains de 5 voitures, la composition sera : 3 motrices et 2 remorques.

b) Comme indiqué précédemment, c'est dans le domaine des bogies que nous avons fait porter au maximum notre effort de recherches. Pourquoi ? D'abord parce que nous estimons que sans un bon bogie il n'est pas de bon matériel, ensuite parce que l'expérience montre que les délais nécessaires à l'étude et à la mise au point d'un bogie passent nécessairement par une longue expérimentation en service avec voyageurs. Sur le plan technique le bogie constitue sans doute le domaine qui requiert le plus impérativement la définition d'une politique que l'on suivra avec continuité.

Entre la formule bimoteur et la formule monomoteur, toutes deux expérimentées à une large échelle par la R.A.T.P., quel est notre choix ? Je pense, que là aussi, la réponse ne peut pas être fournie sous une forme globale et tranchée, ne prenant en compte que le caractère mono- ou bimoteur du bogie. Le nombre des moteurs équipant un bogie ne constitue que l'un des facteurs intervenant dans l'aptitude d'un bogie à remplir avec succès sa fonction. Il existe de bons bogies bimoteurs, bien étudiés et donnant satisfaction en service, il existe aussi des bogies monomoteurs médiocres défaillants sur tel ou tel point.

Fig. 5 — Le matériel fer moderne

Mis en service depuis 1968, ce type de matériel équipe les lignes n°s 3 et 7. Il équipera, à brève échéance, la ligne n° 9.

Une nouvelle génération est en cours d'études et équipera dans une version améliorée les lignes n°s 8 et 13/14.



Fig. 6 — Base de Sucy

Compte tenu des impératifs du service, les essais ne peuvent être exécutés que de nuit sur le réseau de Paris, pendant l'interruption du service de 1 h 00 à 5 h 00, dans des conditions difficiles.

Pour pouvoir faire aboutir certaines études, dans des délais courts, il s'est avéré indispensable de disposer d'une voie d'essais consacrée uniquement aux expérimentations en cours. Dans cet esprit, la R.A.T.P. a équipé, en 1970, une base d'essais d'un kilomètre de long, simulant une interstation.

Il est envisagé de compléter cette base par une boucle d'essais sur laquelle seraient effectués des essais d'endurance.



Ayant rappelé les éléments généraux de cette question afin d'éviter toute ambiguïté dans l'interprétation de notre choix, celui-ci s'est porté, après établissement d'un bilan d'ensemble, sur l'un des bogies monomoteurs développés par l'industrie française. Indiquons brièvement que la solution retenue comporte un moteur longitudinal suspendu avec transmission par cardan et double réduction.

Les avantages de la formule monomoteur résident essentiellement dans :

- l'économie d'entretien de la partie moteur du bogie tant pour l'entretien courant que pour les révisions,
- la possibilité de prévoir un moteur à taux de shuntage élevé, ouvrant pour l'utilisation métro des perspectives intéressantes,
- une répartition des masses favorable.

L'expérience acquise sur notre réseau ne nous a pas permis de mettre en évidence l'un des avantages très souvent mis en avant par les tenants du bogie monomoteur, portant sur l'augmentation de l'adhérence par suppression du déchargement. Que nous n'ayons pas pu mettre en évidence cet avantage ne

nous conduit pas à le nier, mais résulte simplement du fait que dans les conditions où notre expérience a été acquise, deux paramètres intervenaient de façon opposée et que nous n'avons pas pu déterminer l'incidence de chacun.

Le développement du bogie monomoteur sur le réseau de Paris sera accompagné d'une orientation ou d'une recherche portant sur :

- l'adoption systématique de suspension « caoutchouc-métal » au niveau de la primaire et de suspension pneumatique pour la secondaire,
- un niveau de bruit aussi bas que possible pour tous les composants (moteurs, réducteurs, roulement, etc...),
- une qualité de roulement améliorée,...

Quelques problèmes techniques

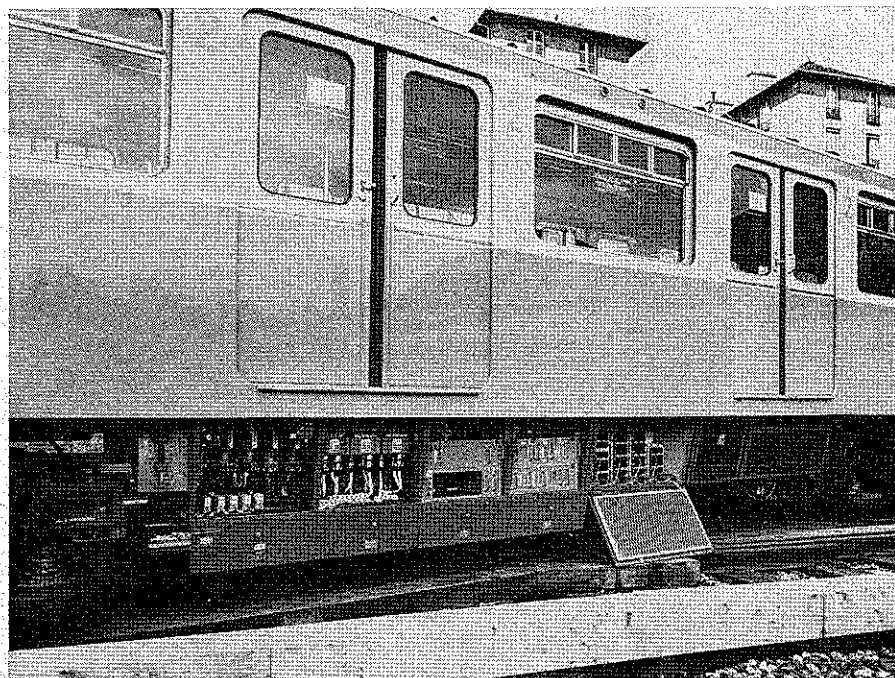
a) Structure des caisses

Pour la structure des caisses, les essais comparatifs entre l'acier ordinaire ou au cuivre, l'acier inoxydable et l'alliage léger ne nous ont pas permis, jusqu'à maintenant, de dégager un avantage décisif pour l'une

ou l'autre de ces solutions. Il nous apparaît qu'en fait chaque mode de construction présente des avantages spécifiques dans un ou plusieurs domaines particuliers et que l'adoption de tel ou tel mode de construction résulte plus de l'adaptation du matériel à son utilisation prévue que d'un choix opéré a priori.

A titre d'exemple, et pour illustrer cette position, supposons que, sur un réseau déterminé, se pose un problème de charge par essieu ou de limitation de la puissance appelée au démarrage; dans ce cas, le choix de l'ingénieur responsable du projet pourra se porter sur la construction aluminium qui, dans l'état actuel de la technique, est celui qui distance très largement les solutions concurrentes dans le domaine des gains de poids.

A Paris nous n'avons pas, pour le moment, de données qui nous imposent l'une ou l'autre de ces solutions, aussi sommes-nous résolus à faire jouer la concurrence technique et commerciale entre les constructions acier et aluminium.



Nous écartons, pour l'instant, la construction acier inoxydable qui ne présente pas d'avantages pour des circulations en tunnel, nous réservant de revoir cette position si un jour nous avons à concevoir un matériel exposé aux intempéries et pour lequel les problèmes de résistance à la corrosion constitueraient le facteur primordial.

b) *Commande des moteurs de traction*

Des communications ont déjà été faites sur les recherches et réalisations de la R.A.T.P. dans le domaine des commandes statiques par thyristors baptisées à la Régie Kesar ⁽¹⁾. Les perspectives ouvertes

par cet équipement ayant maintenant acquis droit de cité sur le plan technique, après les essais en service favorables, sont intéressantes; elles portent, dans le cas du réseau de Paris, essentiellement sur la possibilité de réduire l'échauffement dans les tunnels, conséquence de la réduction de la consommation d'énergie, à trafic et performances identiques.

Au passif de la technique Kesar sont à porter son volume, son poids et son prix. L'évolution technologique de ce secteur de fabrication que l'on pressent rapide, peut, grâce aux efforts développés par les industriels, rendre son adoption de plus en plus attractive.

c) *Aménagements*

C'est l'un des facteurs qui contribue largement à l'image de marque de notre métro auprès de la population parisienne et nous sommes bien décidés à porter sur ce point un effort important.

Sur le plan du « design » il faut bien reconnaître que nous ne pouvons pas laisser libre cours à l'ima-

Fig. 7 — Motrice Kesar

La R.A.T.P. a procédé à une expérimentation intensive, en service, des contrôles de moteurs de traction par thyristors. Cette technique est d'ores et déjà applicable aux futures commandes. Malgré son prix et son poids, elle s'imposera sans doute par les économies d'énergie qu'elle procure.

Cliché Color Service, Paris

gination car les contraintes, tant de construction que d'exploitation, interviennent vite.

Les limitations qui s'imposent à l'ingénieur chargé du projet, loin de nous décourager, nous conduisent au contraire à une recherche permanente, de façon à utiliser au mieux les quelques centimètres, voire les quelques millimètres, sur lesquels on peut jouer.

En ce qui concerne la décoration il ne faut pas oublier qu'une voiture de métro devra durer au moins 20 ans... peut-être 30 - 40, nous avons encore quelques

(1) Voir R.G.C.F. de janvier 1973 — Expérimentation d'équipements à hacheurs (Kesar) pour le contrôle des moteurs de traction du métropolitain de Paris, par J. Leroy et S. Guibereau.

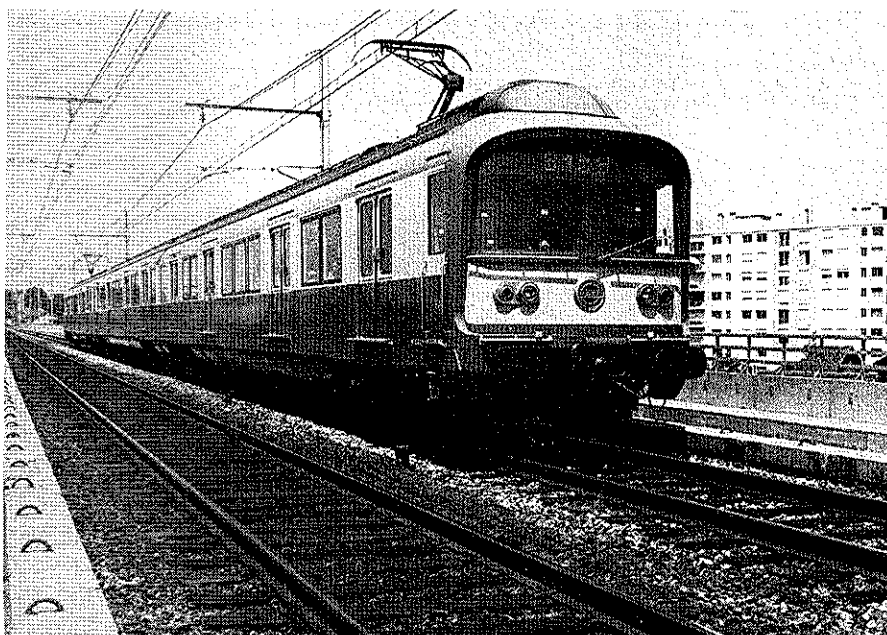


Fig. 9 — MS 61

Ce type de matériel équipe les branches Est et Ouest du métro régional.

Quelques éléments ont permis de renforcer le service de la ligne de Sceaux. Matériel fiable, performant, silencieux et confortable, il sera prévu pour les extensions futures jusqu'à l'apparition du matériel d'interconnexion étudié en liaison avec la S.N.C.F.

de train, liée bien entendu à la longueur des quais, offrir le maximum de places. Ce choix excluait des formules dans lesquelles on prélève pour installer les équipements de traction une place « utile », même réduite;

- nous avons attaché une priorité à la facilité d'échange des voyageurs en stations, facteur essentiel pour assurer un intervalle aussi réduit que possible et par conséquent un débit important. Dans ce but, le diagramme a été conçu avec 4 portes par voitures, régulièrement réparties sur toute la longueur du train et a imposé un plancher sans variation de hauteur;
- nous avons choisi des performances de démarrage élevées ($0,9 \text{ m/s}^2$ dans la phase initiale d'accélération) afin d'aboutir à une bonne vitesse commerciale et un intervalle court.

Ces choix de base, au niveau du projet, ont en définitive abouti au matériel maintenant en service depuis plusieurs années; l'expérience a confirmé sa bonne adaptation au service. Il faut, de plus, mentionner que le pourcentage élevé d'essieux moteurs minimise les conséquences des incidents de matériel, c'est là un avantage apprécié qui permet à l'exploitant de résoudre au mieux la perturbation.

Le matériel MS. 61 se caractérise :

- par une construction de caisse en acier sur des bases relativement classiques,
- par un bogie à suspension pendulaire dont les qualités de confort, dans nos conditions d'utilisation, sont excellentes,
- par une commande des moteurs de traction, faisant appel à la technique des transducteurs.

Dans l'avenir, pour les commandes qui interviendront en vue des futures extensions, et dans l'hypothèse où les conditions d'utilisation ne seraient pas profondément modifiées, notre intention, pour des raisons d'homogénéité de parc, serait de reconduire ce même type de matériel en y apportant peut-être quelques modifications, dans l'aménagement, sans toucher aux caractéristiques fondamentales.

Seules les futures perspectives de l'interconnexion peuvent nous amener à modifier cette position et à étudier en collaboration avec la S.N.C.F., un nouveau matériel bi-courant pouvant circuler indifféremment avec alimentation 1 500 V continu et 25 kV - 50 Hz.

Bien entendu à l'occasion de l'étude des matériels grand gabarit se posent des problèmes de même nature que ceux soulevés pour le matériel petit gabarit : choix de la structure, automatismes... Les solutions adoptées pour l'un et l'autre type de matériels ne seront pas nécessairement les mêmes, car les fonctions à assurer peuvent être différentes. L'exposé des problèmes et des solutions spécifiques au grand gabarit nécessiterait, à lui seul, même sous forme résumé un développement particulier.

*
* *

CONCLUSION

Le domaine technique du matériel roulant est vaste, vaste par la diversité des problèmes à résoudre, vaste par l'élargissement de l'éventail des solutions rendues possibles par l'évolution et la commercialisation des nouvelles techniques. Nous pouvons même nous interroger pour savoir si dans les années qui

viennent, compte tenu des possibilités de la technique, nous n'assisterons pas à une remise en cause des solutions classiques.

Il faut noter, et je pense que le lecteur en aura été convaincu en parcourant cet article, que lorsque nous parlons de solutions classiques il ne s'agit pas d'un conservatisme désuet mais bien d'une évolution permanente tirant profit de toutes les technologies modernes. Ainsi définies les solutions classiques nous paraissent devoir s'imposer dans l'avenir pour la desserte des grandes agglomérations.

La R.A.T.P. a participé, sous des formes diverses, à l'étude et à la réalisation de nouveaux métros en France et à l'étranger; à chaque fois, les responsables de la construction, après avoir examiné toutes les possibilités, se sont prononcés pour des solutions classiques. Cette unanimité constitue une preuve de la jeunesse de ces solutions. Bien entendu, pour résoudre des problèmes qui sortiraient du cadre de

la desserte de grandes agglomérations, des systèmes nouveaux peuvent être envisagés. Il y a là tout un domaine où l'imagination est de mise.

La crise de l'énergie, mise en lumière par les récents événements, nous incite à rechercher des solutions économiques sur le plan de la consommation. Ce facteur infléchira dans l'avenir certains de nos choix et constituera pour nous une incitation vers de nouvelles recherches.

D'une façon globale, la crise de l'énergie, liée à la poursuite et à la consolidation de l'urbanisation, justifiera dans les années qui viennent, tant à Paris que dans toutes les grandes métropoles, une accélération des programmes de modernisation et d'équipement.

Dans le domaine du matériel roulant, les potentiels d'études et d'équipements de l'industrie française, déjà existants ou à réaliser, permettront de faire face à cette demande accrue.

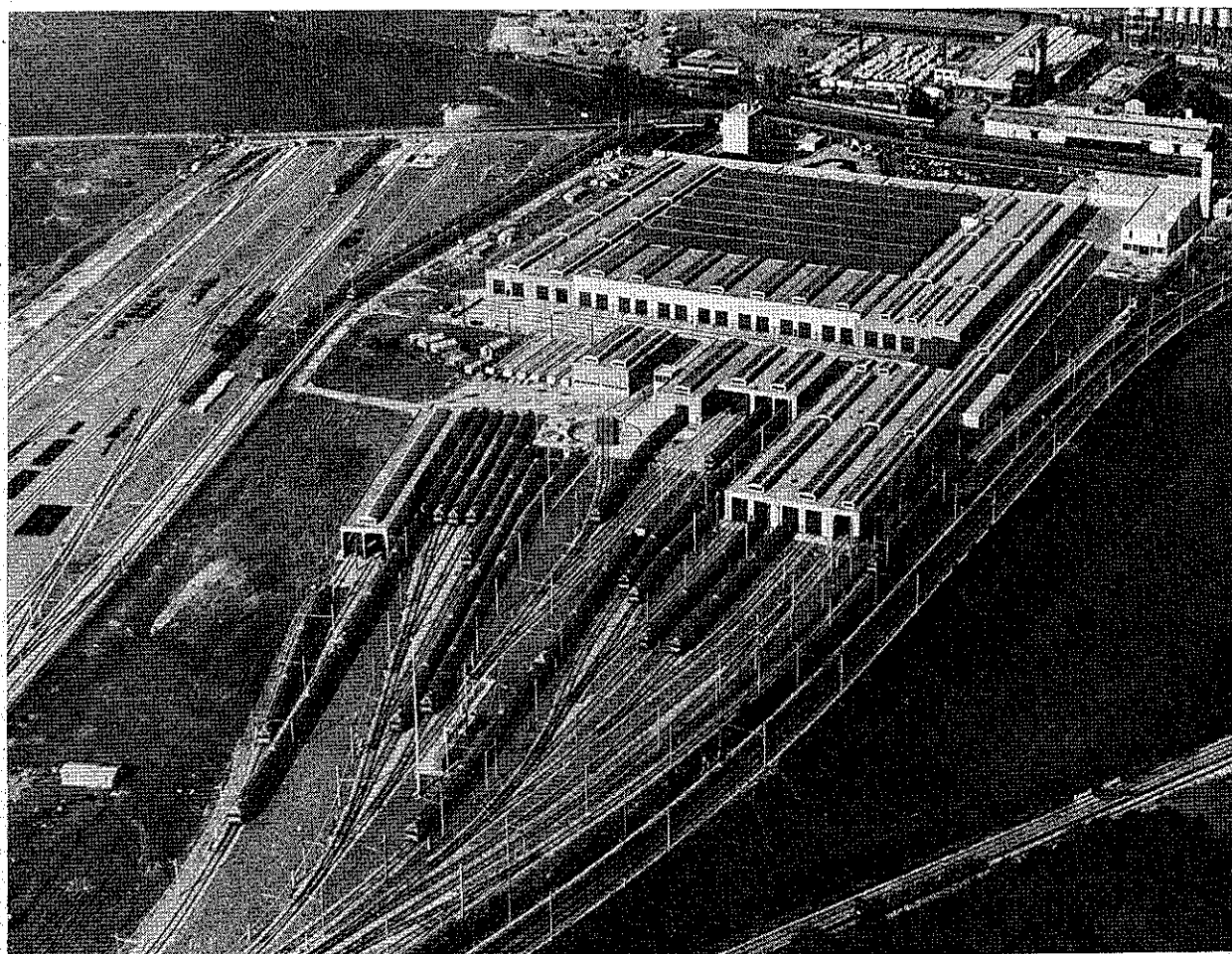


Fig. 10 — Ateliers de Boissy

On voit, sur cette photo, les récents ateliers de Boissy-Saint-Léger destinés à l'entretien des matériels du métro régional. L'implantation d'ateliers à Paris et dans la proche banlieue nécessite une prévision à long terme, afin d'assurer à temps les réservations nécessaires

SUMMARY

Pierre FAUCHEUX :
ROLLING STOCK FOR THE PARIS METRO

R.G.C.F. - May 1973, p. 253

The author, Head of the RATP Railway Rolling Stock Department, explains in this article the factors governing the design and construction of such rolling stock in relation to the various services that must be provided passengers and the operating requirements from the dual aspect of their type and conditions of use. He considers in turn rolling stock for the reduced-gauge urban network and for the normal-gauge regional network. He describes and gives reasons for the choice of the modern rolling stock put into service, with particular reference, in the first case, to articulated stock, rubber-tyred stock and modern steel-tyred stock, and to the different technical problems involved, and, in the second case, to the MS 61 stock. He concludes by referring to the considerable progress made in recent years, adding that the principles of the conventional solutions are perfectly sound as proved by RATP-type installations operated in foreign countries. Attention is also directed to the effects of the energy crisis on research and on the most economical solutions that be adopted as a consequence.

ZUSAMMENFASSUNG

Pierre FAUCHEUX :
DIE PARISER METRO-FAHRZEUGE

RGCF - Mai 1974, S. 253

Der Verfasser, der Leiter des Dienstes « Rollendes Material » des RATP-Netzes ist, legt in diesem Artikel die Leitlinien der Entwicklung und Konstruktion der Fahrzeuge nach Massgabe der für die Reisenden zu erbringenden verschiedenartigen Leistungen und der dienstlichen Erfordernisse dar, denen aufgrund der Art dieser Fahrzeuge und des Rahmens ihrer Verwendung Rechnung zu tragen ist. Er untersucht nacheinander den Fall des Stadtnetzes (Fahrzeuge mit kleiner Begrenzungslinie) und den Fall des Regionalnetzes (Fahrzeuge mit grosser Begrenzungslinie). Ferner nennt er die Gründe, die für die Wahl der in Betrieb genommenen modernen Fahrzeuge gesprochen haben, und beschreibt insbesondere im ersten Fall die Gliederfahrzeuge, die Fahrzeuge mit Gummireifen und die modernen Fahrzeuge sowie verschiedene technische Probleme, die sich ergeben haben. Im zweiten Fall behandelt er die Fahrzeuge MS 61. Abschliessend weist er auf die beachtliche Entwicklung hin, die sich in den letzten Jahren vollzogen hat, ohne dass dabei die Grundsätze der herkömmlichen Lösungen in Frage gestellt wurden. Dabei kommt er auch auf die Bedeutung der von der RATP im Ausland verwirklichten Projekte und die Auswirkungen zu sprechen, die die Energiekrise auf die Untersuchungen und die in Betracht zu ziehenden wirtschaftlichsten Lösungen gehabt hat.