

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 65 (1974)

Heft: 5

Artikel: Rames de banlieue à thyristors

Autor: Schaffner, J.C.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915363>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 05.02.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Rames de banlieue à thyristors

Par J. C. Schaffner

625.45:621.314.632

La composition des rames de banlieue est présentée sous forme comparative et selon les critères d'utilisation en Suisse, pour remplir les tâches dévolues aux transports publics suburbains circulant sur des réseaux ferrés existants. L'application de nouvelles techniques tant en ce qui concerne la partie mécanique que l'équipement électrique permet d'atteindre des performances élevées tout en diminuant le nombre des essieux moteurs. Les caractéristiques qu'il est souhaitable d'obtenir sont indiquées, ainsi qu'une méthode de première approximation pour le calcul de la puissance correspondante. Un exemple d'équipement électrique moderne à thyristors est décrit avec explication du choix et du dimensionnement des composants, et de leur disposition dans les automotrices. La conception de l'équipement électronique de commande ainsi que ses extensions possibles sont exposées en fin d'article.

1. Généralités

L'augmentation sans cesse croissante du besoin des grands centres en main d'œuvre, liée aux limites d'expansion géographique de ceux-ci implique qu'une forte proportion de la population active des grandes villes réside à la périphérie, dans les banlieues éloignées jusqu'à environ 50 km des centres importants.

Les moyens de transports utilisés jusqu'à ce jour pour permettre le transfert du lieu de résidence au lieu d'activité sont de deux types: les transports individuels et les transports collectifs ou publics.

Lorsque l'on parle de transports individuels on fait appel à la voiture automobile; il n'est pas besoin de signaler ici en détail les problèmes que posent actuellement ces véhicules par leur consommation en énergie polluante alors que l'épuisement des ressources naturelles d'énergie paraît relativement proche et que le degré de pollution provoqué par la combustion du carburant et les différents toxiques résiduels sont autant d'épées de Damoclès dirigées sur l'humanité tout entière. A titre d'information, mentionnons qu'en Suisse, la consommation d'énergie électrique des chemins de fer représente environ 5 à 6 % de la consommation totale d'énergie du pays. On voit donc qu'une diminution des transports individuels au profit des transports publics ne pourrait qu'être favorable à une utilisation rationnelle des ressources énergétiques. Mises à part certaines liaisons assurées par des cars ou autobus desservant des régions isolées sur des parcours limités, une grande partie des transports publics suburbains est assurée par le moyen de la traction électrique sur rails.

Conscients de l'importance des transports suburbains, plusieurs pays ont étudié les variantes à retenir dans le but d'assurer ce genre de trafic spécifique. Les solutions proposées en Suisse tendent vers la mise en service de rames de banlieue à un ou plusieurs véhicules-moteurs et une ou deux voitures remorquées. Chaque rame-unité est une composition de base dont la capacité est d'environ 200 à 300 places assises, prévue pour être accouplée en unités multiples formant une composition totale constituée d'au maximum quatre rames-unités.

Dans les chapitres suivants, nous nous attacherons à définir les lignes de forces qui président à la conception des rames de banlieue en nous référant aux diverses exécutions en service ou prévues par différents exploitants.

1.1 Données des services d'exploitation

Le réseau ferroviaire représentant le support du trafic de banlieue est en général existant ainsi que les installations telles

Die Zusammensetzung der Vorortzüge ist vom Standpunkt der Anwendungskriterien in der Schweiz dargestellt, um die Aufgaben zu erfüllen, welche dem öffentlichen Vorortverkehr, der auf den vorhandenen Eisenbahnnetzen verkehrt, zufallen. Die Anwendung einer neuen Technik sowohl in bezug auf den mechanischen als auch auf den elektrischen Teil der Zugkomposition erlaubt, höhere Leistungen bei einer kleineren Anzahl Triebachsen zu erreichen. Die gewünschten Charakteristiken sowie eine vereinfachte Methode für die Berechnung der entsprechenden Leistung sind angegeben; die moderne elektrische Ausrüstung mit Thyristoren ist beschrieben; die Wahl und der Platzbedarf der Komponenten und deren Anwendung in den Triebwagen erklärt. Das Konzept der elektronischen Steuerausstattung sowie mögliche Erweiterungen sind am Schluss des Artikels ersichtlich.

que gares, quais, aiguillages, signalisation et station de distribution d'énergie qui sont très souvent inextensibles. Il ne s'agit donc pas de définir un nouveau concept pour la réalisation des installations fixes mais bien plutôt d'utiliser de façon optimale les possibilités des structures existantes. Des pointages successifs effectués en période de trafic de pointe ainsi qu'aux heures creuses à toutes les gares devant être desservies permettront de déterminer le nombre de places à mettre à disposition des voyageurs; on notera également le taux de préférence pour les compartiments de première et deuxième classe ainsi que le volume ou poids des marchandises qu'une telle composition devrait transporter. Une donnée importante qui aura également un argument de poids quant à la longueur totale de la composition est la longueur utilisable maximum des quais qui est souvent relativement réduite en banlieue. La quantité totale de voyageurs que l'on pourra transporter aux heures de pointe sera déterminée par la capacité des convois et la fréquence de circulation. Aux heures creuses par contre, cette capacité doit être réduite ainsi que la fréquence de circulation. C'est la raison pour laquelle, comme nous l'avons mentionné plus haut, chaque rame-unité sera composée de 3 ou 4 véhicules représentant une longueur de 70 à 100 m suivant les exécutions. Nous mentionnons ci-après à titre de comparaison les caractéristiques de différentes exécutions réalisées à ce jour et ayant fait leur preuves en service régulier ainsi qu'un type de rame de banlieue moderne réalisable à l'aide des techniques récentes tant du point de vue de la construction mécanique que de l'équipement électrique (tableau I, colonnes 5 et 6).

Les valeurs citées ci-dessus appellent les commentaires suivants:

– Les rames RABDe 12/12 (fig. 1a) ont été mises en service par les Chemins de fer fédéraux suisses en 1965; il s'agit d'une construction traditionnelle en acier ce qui explique sa tare relativement élevée.

– D'autre part le fait d'introduire un compartiment fourgon de 10 m² de surface diminue le nombre total des places d'environ 40. Ce compartiment fourgon a été repris à surface égale en ce qui concerne les deux variantes que nous nous proposons d'étudier, les RABDe 8/12 et 8/16.

– Le nombre élevé de voyageurs que peut transporter la rame ET 420 (fig. 1b) de la Deutsche Bundesbahn est obtenu par l'encombrement réduit des sièges des places assises, laissant ainsi des surfaces importantes pour les places debout. Il faut souligner à ce sujet que la rame ET 420 a été conçue dans un but de transport de masse offrant des prestations de confort différentes de ce qui est exigé en Suisse pour des véhicules similaires; ce qui en l'occurrence, en plus du fait que la voiture motrice intermédiaire de la rame ET 420 soit réalisée en alliage léger, se traduit par une différence sensible de la tare comparativement aux RABDe 12/12.

– Les rames RABDe 8/12 et 8/16 (fig. 1c) sont construites exclusivement en alliage léger et comportent approximativement le même genre d'équipement intérieur que les RABDe 12/12. On notera particulièrement le gain de poids réalisable entre construction acier type RABDe 12/12 et alliage léger RABDe 8/12 qui se traduit par une économie de tare de l'ordre de 29%. Dans ce sens la tare de la composition RABDe 8/16 possédant au total quatre voitures n'est que légèrement supérieure à la tare de la rame ET 420 à trois voitures.

– Il est intéressant de mentionner la capacité de transport qui peut être obtenue avec le matériel de banlieue aux heures de pointe. En admettant une composition comprenant 4 rames RABDe 8/16 en unités multiples (2000 places) toutes les 5 min, on obtient une capacité de 24000 personnes par heure et par direction, valeur qui peut être doublée en cas de besoin.

– La hauteur de plancher des rames de banlieue étant de l'ordre de grandeur de 1000 mm en Suisse, la place à disposition pour le moteur de traction dans le bogie est limitée. La comparaison des divers types de rames ci-dessus montre que pour une rame en acier et des moteurs monophasés directs, tous les essieux de la rame sont moteurs. Par l'utilisation d'une construction en alliage léger et des moteurs à courant ondulé l'exemple de la RABDe 8/16 montre que la moitié seulement des essieux sont moteurs. La puissance massique (chap. 2) rend également compte de cette possibilité.

1.3 Composition-unité rigide ou déformable, unités multiples

Les deux premiers types de rames mentionnés plus haut, appartenant aux séries RABDe 12/12 et ET 420, sont des compositions dites rigides par le fait des nombreuses liaisons électriques nécessaires à l'alimentation des circuits des moteurs de traction disposés dans la voiture intermédiaire; ces compositions ne sont découplables qu'en atelier pour les besoins de l'entretien. Par opposition les deux types RABDe 8/12 et 8/16 sont conçus de manière différente et sont du type de composition déformable en ce sens que l'on peut à partir d'une rame RABDe 8/12 et par simple adjonction d'une voiture intermédiaire supplémentaire obtenir la composition RABDe 8/16. Cette possibilité est envisagée pour répondre aux différents besoins en capacité observés dans diverses banlieues. Pour ce faire tous les véhicules de la rame sont équipés d'un accouplement multiple qui peut être automatique ou semi-automatique

(fig. 2) ayant pour fonction, en plus d'assurer la liaison mécanique entre les voitures, de relier tous les circuits pneumatiques et électriques d'asservissements. Par ce moyen, il devient alors possible de «moduler» la composition de la rame-unité selon les besoins spécifiques. Cette condition impose toutefois la nécessité de disposer la totalité de l'équipement électrique dans les automotrices d'extrémité.

Toutes les rames des types cités ci-dessus sont prévues pour être accouplées en unités multiples dont le nombre se limite généralement à quatre unités. Ces formations se réalisent à l'aide des coupleurs entièrement automatiques que chaque automotrice possède à sa partie frontale (fig. 2). Les capacités en voyageurs que nous avons citées précédemment sont alors multipliées par quatre et répondent aux besoins du trafic en heure de pointe. Ces mêmes compositions multiples peuvent également être mises en service sous forme de trains assurant des services spéciaux ou occasionnels.

Les rames-unités possèdent chacune deux automotrices dont la marche est absolument réversible; le mécanicien conduit le convoi à partir de la cabine de conduite de l'automotrice de tête aussi bien pour une rame-unité simple que pour une composition multiple; chaque automotrice d'une composition est donc asservie aux commandes de l'automotrice de tête.

Un autre avantage très important de deux automotrices dans une rame est qu'en cas de défaut de l'une d'entre elles, la composition peut poursuivre le service à performances réduites.

2. Critères de définition des performances

Nous avons vu plus haut que les rames de banlieue sont appelées à circuler sur des réseaux déjà existants dont les caractéristiques de la voie sont généralement établies pour du matériel de traction courant. Dès lors, la vitesse maximale de la rame est liée au réseau ferroviaire sur lequel elle est appelée à circuler. D'autre part, qui dit service de banlieue indique que la distance moyenne entre les stations est réduite. Le plus souvent

1.2

Tableau I

Données principales Entreprise, pays Série	1 CFE RABDe 12/12	2 DB (Allemagne) ET 420	3 SNCF (France) Z 6400	4 NSB (Norvège) BM/BS 69	5 RABDe 8/12	6 RABDe 8/16
Nombre de motrices	2	2	2	1	2	2
Nombre de remorques motrices	1	1	–	–	–	–
Nombre de remorques tractées	–	–	2	1	1	2
Disposition des essieux moteurs	Bo'Bo' + Bo' Bo' + Bo'Bo	Bo'Bo' + Bo'Bo' + Bo'Bo	Bo'Bo' + Bo'Bo'	Bo'Bo' + 2'2'	Bo'Bo' + 2'2' + Bo'Bo'	Bo'Bo' + 2'2' + 2'2' + Bo'Bo'
Type de moteur	monophasé direct	courant ondulé	courant ondulé	courant ondulé	courant ondulé	courant ondulé
Disposition des compartiments	B + AD + B	B + AB + B	AD + B + B + E	B + B	B + AD + B	B + AD + B + B
Tare de la rame	172 t	138 t	176 t	82 t	122 t	145 t
Charge utile nominale	28 t	34 t	≤ 58 t	≤ 21 t	24 t	32 t
Poids total en charge nominale	200 t	172 t	≥ 234 t	≥ 103 t	146 t	177 t
Nombre de places assises						
première classe	56	33	72	–	54	54
deuxième classe	148	161	292	191	144	224
Nombre de places debout	160	254	409	89	179	243
Nombre total de places	364	448	773	280	377	521
Rapport du poids adhérent au poids total en charge	1	1	≥ 0,58	0,625	0,782	0,635
Longueur totale de la composition	73,3 m	67,4 m	92,3 m	49,7 m	75 m	100 m

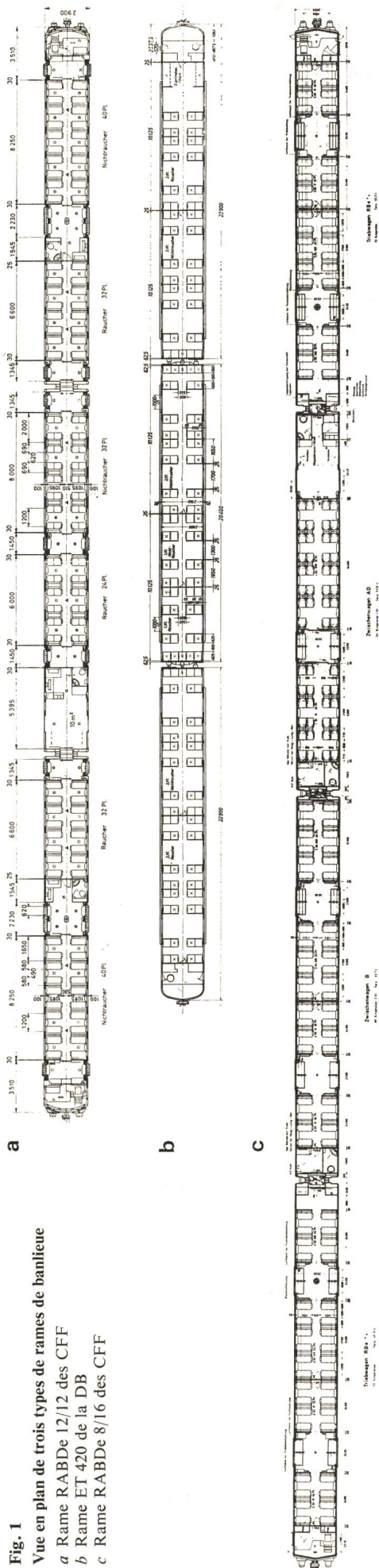


Fig. 1
 Vue en plan de trois types de rames de banlieue
 a Rame RABDe 12/12 des CFF
 b Rame ET 420 de la DB
 c Rame RABDe 8/16 des CFF

les valeurs citées sont comprises entre 2,5 et 3 km et ne permettent donc pas d'atteindre des vitesses élevées. Cette vitesse maximale, compte tenu de la distance moyenne entre stations, de la phase d'accélération et de celle de freinage, se situe dans ces conditions à la valeur maximale prescrite le plus généralement sur l'ensemble du réseau suisse soit à 125 km/h.

La vitesse maximale ne jouant pas un rôle déterminant dans le trafic de banlieue, on portera son attention à l'accélération au démarrage ainsi qu'à la décélération au freinage; ce sont précisément ces deux phases qui sont prépondérantes dans un diagramme de marche type. A titre d'illustration nous pouvons citer le gain de temps de 17 %, réalisé par le remplacement sur le parcours Paris-St-Cloud des trains dont la vitesse maximale de 120 km/h et 0,4 à 0,45 m/s² de valeurs d'accélération et décélération par du matériel à même vitesse maximale mais atteignant des valeurs de 0,9 m/s² en accélération. La puissance massique est une grandeur susceptible de donner une image des performances de la composition; c'est le rapport de la puissance unihoraire à la masse totale en charge maximale.

Comparaison de puissances massiques:

1. Train navette formé de 9 véhicules
 (RBe 4/4 + 7 voitures intermédiaires
 + 1 voiture pilote) 5,7 kW/t
2. Rame de banlieue lourde à 3 véhicules,
 12 essieux-moteurs RABDe 12/12, CFF [1]¹⁾ 12,6 kW/t
3. Rame de banlieue lourde à 3 véhicules,
 8 essieux-moteurs. Essais RABDe 8/12 CFF [1] 9,3 kW/t
4. Rame de banlieue lourde à 4 véhicules,
 8 essieux-moteurs. Essais RABDe 8/16 CFF [1] 7,6 kW/t
5. Rame de banlieue semi-légère à 4 véhicules,
 8 essieux-moteurs. Z 6400 SNCF (France) [2] 11 à 12 kW/t
6. Rame de banlieue lourde à 2 véhicules
 4 essieux-moteurs: BM/BS 69 NSB (Norvège) 11 à 12 kW/t
7. Rame de banlieue légère à 3 véhicules,
 8 essieux-moteurs: RABDe 8/12 14,8 kW/t
8. Rame de banlieue légère à 4 véhicules,
 8 essieux-moteurs: RABDe 8/16 12,1 kW/t

Ces puissances massiques sont données pour des charges maximales et des puissances unihoraires. Sous chiffre 1. la charge est représentée par les places assises; sous 2. à 4. pour les places assises et debout. Les chiffres 7. et 8. sont donnés pour des rames de puissance de 5 à 6 % plus faibles que sous 3. et 4. mais construites entièrement en alliage léger, démontrant ainsi le gain appréciable qu'il y a d'utiliser les nouvelles techniques. La limite imposée au rapport massique est de trois ordres

- le bilan économique constitué par les frais de construction mis en regard du gain à réaliser en consommation d'énergie;
- le coefficient d'adhérence dont la valeur ne peut guère dépasser $\mu = 0,2$ pour des états de voies variables même si l'équipement électrique est capable de fournir un effort de traction progressif et sans à-coups;
- la place disponible pour la disposition de l'équipement électrique dont la puissance est sans cesse plus importante.

3. Choix du schéma du circuit principal

L'alimentation des moteurs de traction au moyen d'un redresseur semi-commandé offre l'avantage d'opérer une régulation précise voire permanente et de manière entièrement statique. Cet avantage est utilisé pour le contrôle du courant des

¹⁾ Voir bibliographie à la fin de l'article.

moteurs dans la phase d'accélération; de même une régulation semblable peut être appliquée au courant d'excitation des moteurs dans la phase de shuntage. Il devient alors possible d'utiliser des moteurs de traction à excitation composée permettant de mettre à profit ces avantages.

Le rapport poids/puissance de ce type de moteur est également très favorable par comparaison au moteur monophasé direct ce qui permet, dans les bogies bi-moteurs où la place à disposition est souvent réduite, d'installer une puissance de traction pourtant importante tout en conservant une hauteur de plancher permettant un accès facile même pour de faibles hauteurs de quais. De plus, ce moteur est caractérisé par sa robustesse, par une bonne commutation à tous les régimes et par un nombre de balais réduit ne nécessitant qu'un entretien restreint. Le redresseur principal qui alimente le circuit des moteurs de traction se compose d'un redresseur d'excitation en pont de *Graetz* entièrement commandé et d'un redresseur d'induit à quatre ponts semi-commandés couplés en série. Nous ne reviendrons pas sur les critères servant à définir ce choix et nous renvoyons le lecteur aux articles cités dans la bibliographie traitant de ce problème. Rappelons toutefois qu'il représente une solution optimale au point de vue de son prix, poids, encombrement, nombre d'éléments en fonction du niveau des harmoniques impairs qu'il produit et du facteur puissance qu'il permet d'obtenir. Les essais effectués à cet égard sur du matériel de grande traction viennent confirmer le choix de cette variante comparée aux redresseurs à deux ou huit ponts semi-commandés couplés en série. La composante alternative du courant redressé est limitée par l'insertion en série avec les moteurs de traction d'une bobine de self. L'inductivité de cette bobine doit être calculée de façon à ce que la valeur de crête de l'ondulation du courant soit comprise entre 25 et 35 % au voisinage du régime unihoraire. La caractéristique de l'inductivité en fonction du courant redressé moyen devrait avoir une allure hyperbolique pour que l'ondulation reste constante; car la composante alternative doit varier proportionnellement au courant moteur alors que la tension secondaire reste approximativement constante. Ce courant redressé et lissé, dont la pulsation résiduelle possède une fréquence de 33,3 Hz, permet au véhicule d'obtenir d'excellentes conditions d'adhérence étant donné que l'ondulation du couple de trac-

tion au niveau du contact roue-rail n'est plus que de quelques pourcents.

En freinage, deux solutions de schémas peuvent être réalisées:

– le freinage par récupération dont l'avantage principal est d'être efficace jusqu'à l'arrêt du véhicule mais il provoque un facteur de puissance λ mauvais particulièrement aux basses vitesses. Il faut également considérer l'influence du schéma de récupération sur la puissance de définition du transformateur qui augmente notablement en fonction de la puissance quadratique moyenne. D'autre part la récupération nécessite l'utilisation d'un redresseur entièrement commandé accroissant la complexité et par conséquent le prix, le poids et le volume du redresseur et de sa commande de grille. Il faudra éventuellement prévoir dans le circuit du courant continu un appareil de protection tel que disjoncteur ultra-rapide;

– le freinage électrodynamique sur résistance à ventilation naturelle. Le toit de l'automotrice offre généralement la possibilité de disposer ces résistances. Comme l'efficacité du frein rhéostatique décroît avec la vitesse, on aura soin de calculer la puissance de définition des résistances pour les vitesses élevées où les énergies cinétiques sont les plus importantes. Pour des vitesses basses et le freinage d'arrêt, l'électronique de commande du véhicule fera intervenir le frein pneumatique de façon progressive permettant de conserver un effort total de freinage constant (fig. 3).

4. Détermination de la puissance

Dans un service de banlieue le tracé de la voie comme nous l'avons vu plus haut est généralement donné, les stations sont déterminées et le profil en long de la ligne connu.

La détermination de la puissance installée sera donc effectuée selon ces critères compte tenu de l'horaire à réaliser duquel découlent les valeurs d'accélération en traction et de décélération en freinage.

Le plus souvent, la puissance de définition est déterminée pour un diagramme de marche en palier, car les réseaux ferroviaires de banlieue ne présentent que des déclivités peu importantes souvent inférieures à 10 ‰ sur des tronçons relativement courts ne dépassant pas quelques kilomètres. Si toutefois, ces conditions de trafic devaient être différentes, il y aurait lieu d'en tenir compte principalement lors du calcul de définition de la puissance des résistances de freinage en cas de décélération donnée sur pente. Les équipements de traction tels que transformateur, self de lissage et moteur de traction possédant des constantes de temps thermiques en général supérieures à 30 min, le franchissement des rampes ne devrait pas influencer la puissance de définition. Le redresseur principal qui possède une constante de temps réduite est normalement défini pour supporter le court circuit aux bornes de la self de lissage jusqu'au déclenchement du disjoncteur principal. De même dans le cas où l'on a prévu une marche de secours de la rame, une automotrice doit poursuivre le service à performances réduites lorsque la deuxième automotrice est avariée. Dans ce cas, le redresseur principal est défini pour supporter des contraintes plus élevées qu'en service normal. A la limite si la rampe est prononcée et se prolonge sur une distance importante on devra tenir compte du temps d'application du courant de démarrage sur la rampe maximale. Il apparaît toutefois que dans la plupart des cas rencontrés en pratique, lorsque la marche à vitesse maximum est de courte durée et que par conséquent le diagramme de marche type est composé essentiellement de la phase de démarrage et de freinage, le calcul de définition de la puissance est basé sur la marche en palier. La détermination de la puissance se fait généralement à partir des conditions que le véhicule ou la composition doit remplir. On définira la puis-

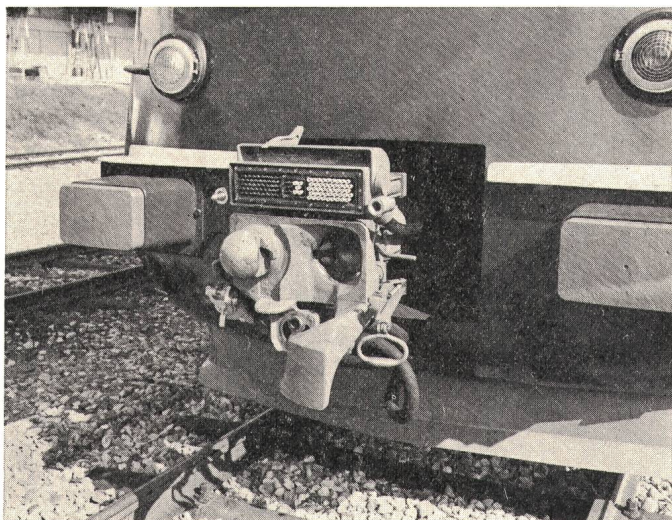


Fig. 2 Attelage automatique

sance des appareils du circuit principal par itérations succes-
sives jusqu'à obtenir la valeur optimale de chaque appareil.

Toutefois, il peut être intéressant, en première approche,
lors de l'établissement d'un projet de définir d'emblée cette
puissance qui déterminera les facteurs importants tels que prix,
poids, encombrement, disposition.

4.1 Exemple de calcul simplifié de détermination de la puissance

Définition des données à $U_{\text{ligne nominale}}$

Données:		RABDe 8/12	RABDe 8/16
Accélérations moyennes demandées			
0 à 80 km/h	en m/s^2	0,86	0,75
0 à 100 km/h	en m/s^2	0,83	0,72
0 à 125 km/h	en m/s^2	0,72	0,62
Décélération constante demandée			
125 à 0 km/h	en m/s^2	0,75	0,75
Poids total en charge	en t	146	177
Distance parcourue	en m	2500	2500
Déclivité	en ‰	0	0
Temps de parcours	en s	117,7	121,3
Temps d'arrêt	en s	20	20

4.2 Moteurs de traction

La vitesse de définition du moteur de traction, pour un
service de banlieue à fortes accélérations, sera élevée et l'on
admettra cette valeur à 80 km/h afin de maintenir le plus long-
temps possible l'accélération la plus forte demandée.

Au freinage, la décélération constante fixée à $0,75 m/s^2$
donne un temps de $t = \frac{34,7 m/s}{0,75 m/s^2} = 46,3 s$

$$\text{parcours } S_{tr} = \frac{at^2}{2} \approx 800 m$$

Le parcours total étant de 2500 m, le parcours de traction
sans marche sur l'erre sera

$$\text{parcours } S_{tr} = 2500 - S_{tr} = 1700 m$$

Energie de mise en vitesse du parcours traction:

$$E_1 = \frac{1}{2} mv^2 \quad \text{où } m = M \gamma$$

$$E_1 = 117500 kJ$$

m = masse en kg

γ = 1,1 représente le coefficient des masses rotatives

v = vitesse maximale en m/s

Energie pour vaincre les pertes à l'avancement

$$E_2 = R_{AV} m S_{tr}$$

$$E_2 = 15050 kJ$$

R_{AV} = résistance à l'avancement moyenne de 0 à 125 km/h,
5 kg/t

$$\text{Energie de traction: } E_3 = E_1 + E_2 = 132550 kJ$$

Energie cinétique de freinage: $E_4 = E_1 = 117500 kJ$

Energie de retenue supplémentaire au freinage

$$E_5 = R_{AV} m S_{tr} \approx 7080 kJ$$

$$\text{Energie de freinage: } E_6 = E_4 - E_5 \approx 110420 kJ$$

Somme d'énergie pour le diagramme type:

$$\Sigma E_D = E_3 + E_6 = 242970 kJ$$

Si l'on veut déterminer la puissance aux bornes des moteurs,
il y a lieu de tenir compte des pertes de transmission que l'on
peut admettre $P_{tr} \approx 3\%$ et du rendement du moteur $\eta = 0,92$

$$\Sigma E_{Mot} = \frac{E_3}{0,97 \cdot 0,92} + E_6 \cdot 0,97 \cdot 0,92 = 148530 + 98540 = 247070 kJ$$

La puissance sera le quotient de l'énergie totale divisée par
le temps total de parcours, arrêt compris.

$$P_{M8} = \frac{247070}{121,3 + 20} \approx 1749 \text{ kW aux bornes de 8 moteurs}$$

$$P_{M1} \approx 219 \text{ kW aux bornes par moteur}$$

Ce premier résultat ne donne qu'une valeur fictive de la
puissance du moteur qui devra être en réalité plus puissant en
raison des fortes sollicitations thermiques dans les zones de
shuntage où les énergies sont prépondérantes. Le tracé des

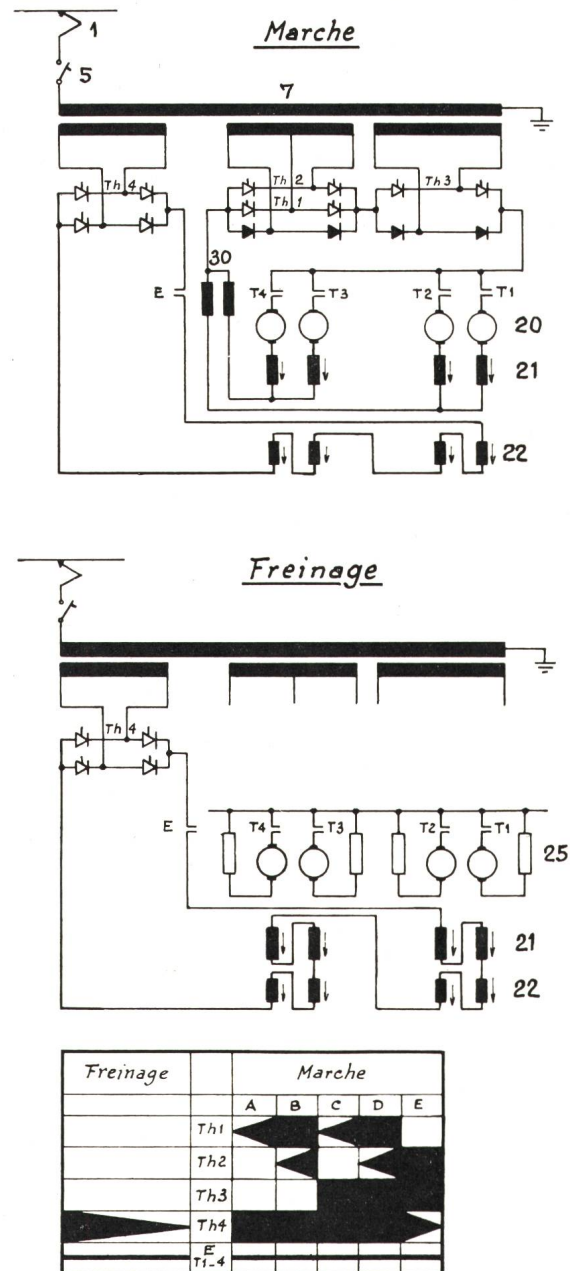


Fig. 3 Schéma du circuit principal

- E Contacteur de séparation de l'excitation
- T Contacteur de séparation des moteurs
- Th 1-3 Redresseur principal semi-contrôlé
- Th 4 Redresseur d'excitation séparée, entièrement contrôlé
- 1 Pantographe
- 5 Disjoncteur principal
- 7 Transformateur
- 20 Induit des moteurs de traction
- 21 Enroulement d'excitation série
- 22 Enroulement d'excitation séparée
- 25 Résistance de freinage
- 30 Self de lissage

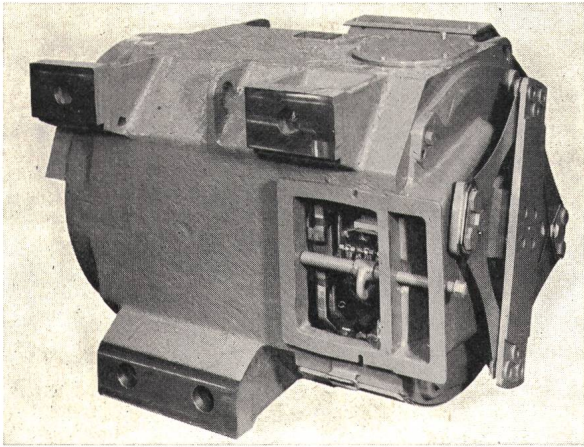


Fig. 4 Exemple d'un moteur de traction entièrement suspendu, équipé d'une transmission à lames SAAS, pour montage dans bogie bi-moteur

perles reporté sur les diagrammes ci-dessous (fig. 7) fait apparaître la valeur de celles-ci en particulier au début du freinage où le courant d'excitation des moteurs est maximum et où la tension des moteurs est élevée.

Dès lors, on voit que la définition de la puissance des moteurs de traction est déterminée dans une grande proportion par les pertes liées à la vitesse. Finalement cette définition résultera de la comparaison des pertes moyennes pour le diagramme considéré et des pertes unihoraires ou en régime continu selon les exigences (fig. 4, 5, 6, 7).

4.3 Transformateur

La définition de la puissance des enroulements de traction du transformateur, plus précise, sera basée sur la phase de traction de 0 à v_{max} .

$$E_{tr} = E_3 = 132550 \text{ kJ}$$

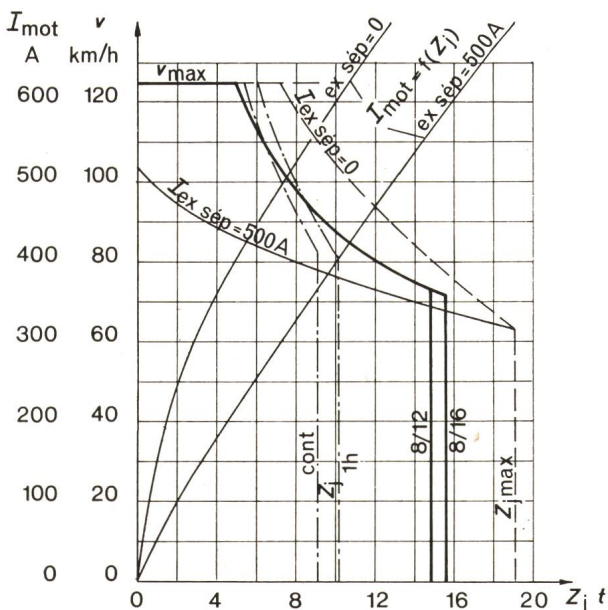


Fig. 5 Caractéristique de marche effort-vitesse

- Z_j Effort total de la rame
- I_{mot} Courant d'induit par moteur
- v Vitesse de la rame
- $I_{exc\ s\acute{e}p}$ Zone de shuntage du courant d'excitation séparée
- I_{mot} Courant d'induit en fonction de l'effort total dans la zone de shuntage du courant d'excitation séparée

En reprenant les pertes de transmission $P_{tr} = 3\%$, le rendement des moteurs $\eta = 0,92$ et le $\cos \phi$ du transformateur $= 0,85$, l'énergie devient

$$E_{tr} = \frac{132550}{0,97 \cdot 0,92} = 148700 \text{ kJ}$$

et correspond à la puissance continue active de:

$$\frac{148700}{121,3 + 20} = 1050 \text{ kW}$$

correspondant à une puissance réactive de

$$\frac{1050}{0,85} = 1237 \text{ kVA}$$

La précision de la valeur obtenue est généralement suffisante en pratique pour une première approche (fig. 8).

4.4 Redresseur

Comme nous l'avons vu plus haut, la détermination de la puissance du redresseur ou mieux sa charge maximale en courant sera définie par sa résistance aux courts-circuits aux bornes de la self de lissage ou la charge en courant en cas de marche de secours lorsqu'un demi-redresseur doit alimenter les quatre moteurs de traction (fig. 9).

5. Disposition des appareils

La construction des rames de banlieue nécessite de disposer les appareils sur le toit ainsi que sous le plancher de l'automotrice afin de laisser une place maximale aux compartiments des voyageurs. L'ensemble des appareils du circuit principal est disposé sous le plancher de l'automotrice, exception faite des appareils haute-tension et des résistances de freinage qui se trouvent sur le toit. Les appareils des circuits auxiliaires sont disposés selon leur fonction généralement sous le plancher. Ceux des circuits d'asservissement se trouvent pour la plupart dans la table du mécanicien et dans les armoires prévues à cet

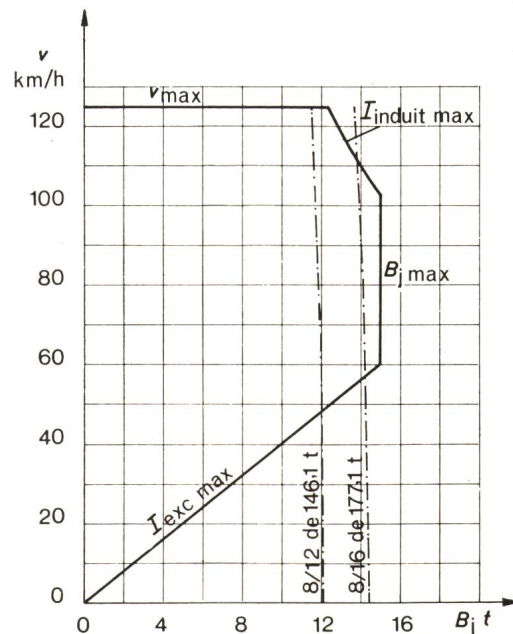


Fig. 6 Caractéristique de freinage effort-vitesse

- B_j Effort total de freinage
- v Vitesse de la rame
- I_{ind} Courant d'induit correspondant au courant dans la résistance de freinage
- I_{exc} Courant d'excitation séparée

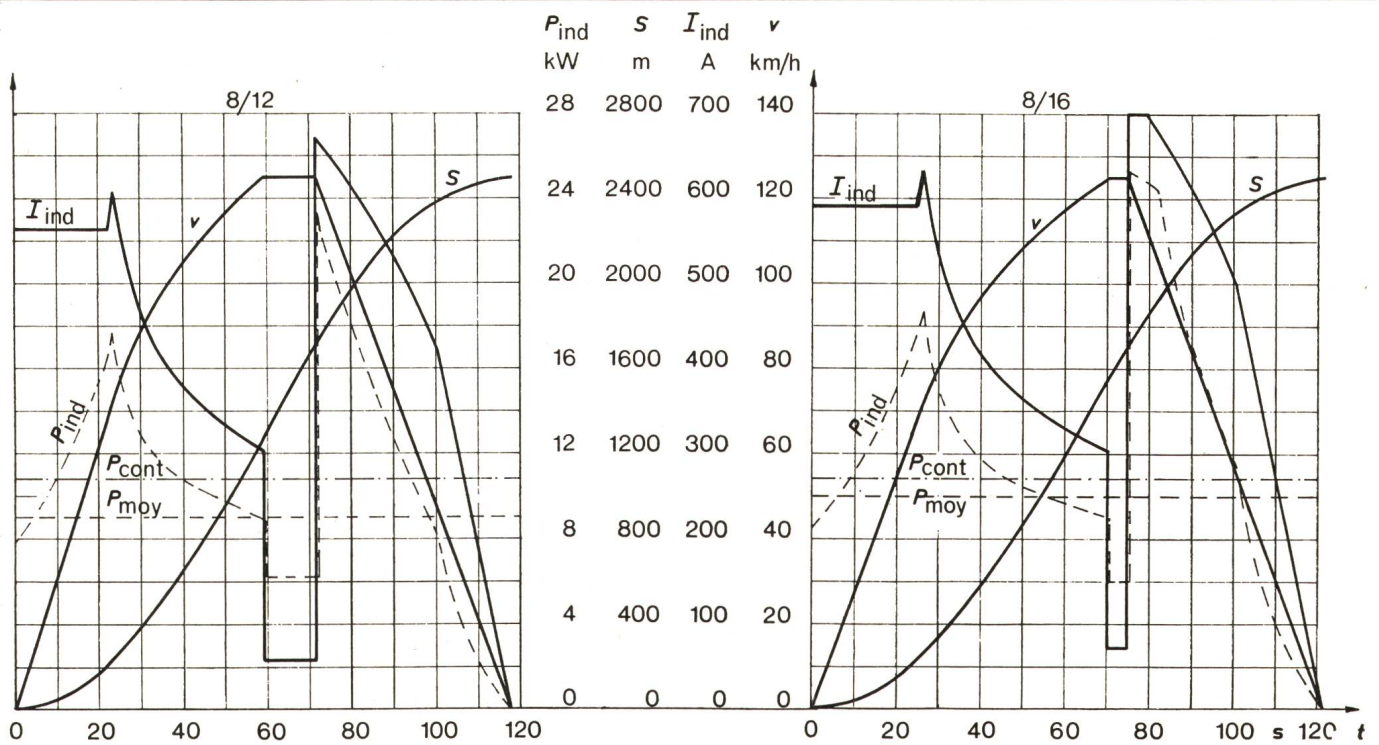


Fig. 7 Diagrammes de marche type

I_{ind} Courant d'induit par moteur
 P_{ind} Somme de pertes fer et cuivre de l'induit, par moteur
 P_{cont} Somme des pertes moyennes par moteur en régime continu

P_{moy} Somme des pertes moyennes par moteur pour chaque diagramme; y compris 20 s d'arrêt entre chaque cycle
 S Chemin parcouru
 v Vitesse de la rame

effet dans la cabine de conduite. Une des préoccupations qui doit être à la base de l'étude de disposition des appareils dans une rame de banlieue sera de grouper les appareils ayant des fonctions communes ou complémentaires et d'effectuer le montage sur des cadres permettant un échange rapide pour les services d'entretien, évitant ainsi une immobilisation trop longue de l'automotrice. De plus, le souci constant de maintenir le poids total du véhicule à un minimum conduit à réaliser tous les cadres et tableaux d'appareils en alliage léger.

La répartition du poids total des appareils sur les essieux détermine l'emplacement des groupes importants tels que transformateur, self de lissage, redresseur, compresseur etc. D'autre part, on accordera une attention particulière à la disposition des canaux de ventilation. L'expérience a montré que les prises d'air doivent se trouver au niveau du toit afin d'éviter les poussières, les salissures et la neige poudreuse que soulève la composition en mouvement. De ce fait, l'air de ventilation provenant du toit et devant être conduit sur le transformateur, le redresseur et les moteurs de traction, passe par un certain nombre de changements de direction et de sections des canaux de ventilation, qui provoquent des pertes de charges importantes. Il est nécessaire de calculer ces pertes et de les minimiser pour ne pas avoir à installer des puissances trop importantes des groupes moteur-ventilateur. Au besoin, la construction et la mesure sur des modèles permettront de choisir les solutions les plus appropriées.

6. Electronique de commande

Le service de banlieue est certes dans le domaine des transports suburbains celui pour lequel un équipement électronique de commande se justifie le plus. La fig. 10 montre le schéma

bloc simplifié d'une électronique de commande d'un équipement de vitesse imposée. Ce dispositif équipe un grand nombre de véhicules en service de grande traction ou de banlieue. De ce fait, il est connu et nous ne relèverons que les particularités nouvelles qui permettent une meilleure efficacité. Nous avons vu précédemment qu'en unité simple ou multiple, la composition était conduite par le mécanicien de l'automotrice de tête. Cela signifie que l'équipement électronique de commande se compose de deux parties: l'émetteur et le récepteur.

La partie émettrice en service dans l'automotrice de tête a pour fonction d'élaborer les ordres suivants qui sont transmis aux autres automotrices de la rame

Traction
 Freinage
 Référence d'effort

et cela en fonction des données mesurées ou imposées suivantes:

v_0 qui est la vitesse imposée soit par le mécanicien dans le cas d'un service conventionnel, soit par un ordinateur de bord qui possède en mémoire toutes les vitesses du parcours à réaliser. Une troisième possibilité consiste en la transmission d'informations et de cette consigne de vitesse en particulier par un conducteur linéaire disposé entre les rails (Linienzugbeeinflussung); en plus, dans ce cas, la gestion du trafic de tous les véhicules d'un secteur pourrait se faire à partir d'un ordinateur central à poste fixe.

v_x, v_y vitesses réelles mesurées sur des essieux porteurs, dans notre cas sur les essieux des voitures intermédiaires.

Le signal v commande la logique de couplage Traction/Freinage qui enclenche en traction pour un écart de vitesse $v - v_0 \geq -1$ km/h et déclenche pour un écart de $v - v_0$

$\geq +0,5$ km/h; en freinage l'enclenchement se fait pour $v - v_0 \geq +1$ km/h, le déclenchement pour $v - v_0 \geq -0,5$ km/h et cela pour des accélérations du véhicule $\gamma = 0$. Une particularité de ces circuits expérimentés en service régulier est la possibilité d'anticiper l'action de la logique de couplage. Lorsque l'accélération $\gamma \neq 0$ et que la référence d'effort Z_0 est voisine de 0 cela signifie que l'on est en présence d'un changement de pente. Si l'accélération augmente ou diminue l'équipement électronique « détectera » une pente ou une rampe et la logique de couplage anticipera en fonction de la valeur de γ pour passer respectivement sur « freinage » ou « marche ».

Les équipements traditionnels de décel de patinage et de glissement doivent nécessairement comporter une zone d'insensibilité causée par la différence d'usure des bandages des roues qui se traduisent par des écarts de mesure de vitesse entre essieux. Le palliatif généralement utilisé pour diminuer cet effet consiste à corriger ces écarts au moyen de potentiomètres à ajuster périodiquement en fonction de l'usure des bandages de chaque essieu. Dans le cas présent, une nouvelle méthode de décel et de compensation automatique des écarts de vitesse dus aux usures des bandages permet une précision accrue et constante de la détection de patinage ou de glissement des roues motrices. Cet équipement est compris dans la partie réceptrice de chaque électronique de commande. Dans une rame toutes les parties réceptrices sont en fonction et agissent, sous l'asservissement de l'émetteur de tête, en tenant compte des mesures de courant des moteurs de traction et de vitesses des essieux moteurs. Une autre particularité que l'on peut mettre à profit lors de l'exécution de rames de banlieue, où l'effort de freinage est important, est la commande du frein pneumatique combinée au frein électrique. Lorsque la référence d'effort de freinage issue de l'émetteur dépasse le 75% de l'effort maximum de freinage électrique, la logique du frein pneumatique commande les électrovalves de freinage des voitures intermédiaires. Puis, lorsque la vitesse décroît et que l'effort de freinage du frein électrique diminue, un complément de frein pneumatique est ajouté aux essieux de l'automotrice pour maintenir une résultante d'effort constante. On voit dès lors qu'au moyen d'un équipement électronique relativement simple et peu encombrant, il devient possible d'asservir un grand nombre de fonction de manière absolument automatique permettant de libérer le mécanicien pour qu'il puisse porter son attention au maximum sur les consignes du tracé et de la signalisation.

7. Dispositifs de marche automatique

Si l'on ajoute au régulateur de vitesse, combiné à un régulateur d'accélération et protégé par un dispositif antipatinage, un dispositif d'arrêt au but et un enregistrement des vitesses limites en fonction du parcours (ou un système de transmission de ces données) on peut réaliser un dispositif théorique de marche automatique. Un tel dispositif ne serait toutefois pas utilisable en pratique à cause de sa rigidité (horaire fixe). Il faut donc introduire un critère supplémentaire permettant une correction fréquente du diagramme de marche pour tenir compte des perturbations intervenues en cours de route (durées d'arrêt variables). Ce critère supplémentaire peut être donné sous la forme de l'heure d'arrivée au terminus, ou sous la forme de l'heure de passage à certains points critiques du réseau.

La marche du convoi ainsi programmée s'effectuera en fonction de l'écart entre le temps réel restant pour atteindre le terminus ou les points de « passages critiques », et le temps pro-

grammé. Selon le signe de cet écart, le convoi perdra du temps par une marche en dérive anticipée (cas de l'avance) ou rattrapera un retard en supprimant la marche en dérive.

On voit donc qu'il est possible d'automatiser la circulation des rames de banlieue de façon à obtenir le débit maximum d'installations de voies existantes, grâce à la régularité de marche et aux corrections permanentes que l'automatisme de conduite apporte (on peut obtenir une précision d'arrivée au terminus qui est de l'ordre de ± 10 s pour un parcours de banlieue d'une durée voisine de 60 min avec 15 arrêts). De tels dispositifs ont été développés et réalisés par l'industrie suisse pour des administrations ferroviaires étrangères.

8. Conclusion

Les transports suburbains par rames de banlieue sont en passe d'occuper une large place dans l'exploitation des transports ferroviaires. La mise en service de rames dont la composition en nombre de véhicules est « modulable » en fonction des besoins dans le temps et dans l'espace devrait répondre aux conditions spécifiques propres à chaque région.

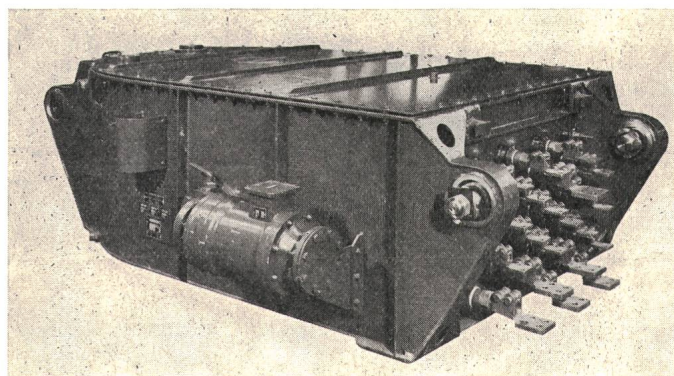


Fig. 8 Transformateur à tôles radiales, de faible hauteur, pour montage sous le plancher de l'automotrice

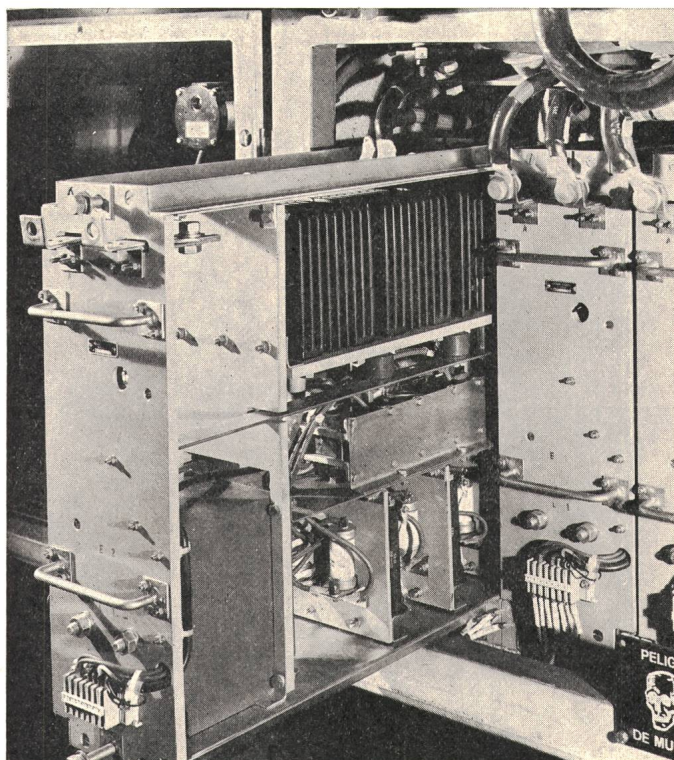


Fig. 9 Redresseur à thyristors composé de tiroirs normalisés, refroidissement à ventilation forcée

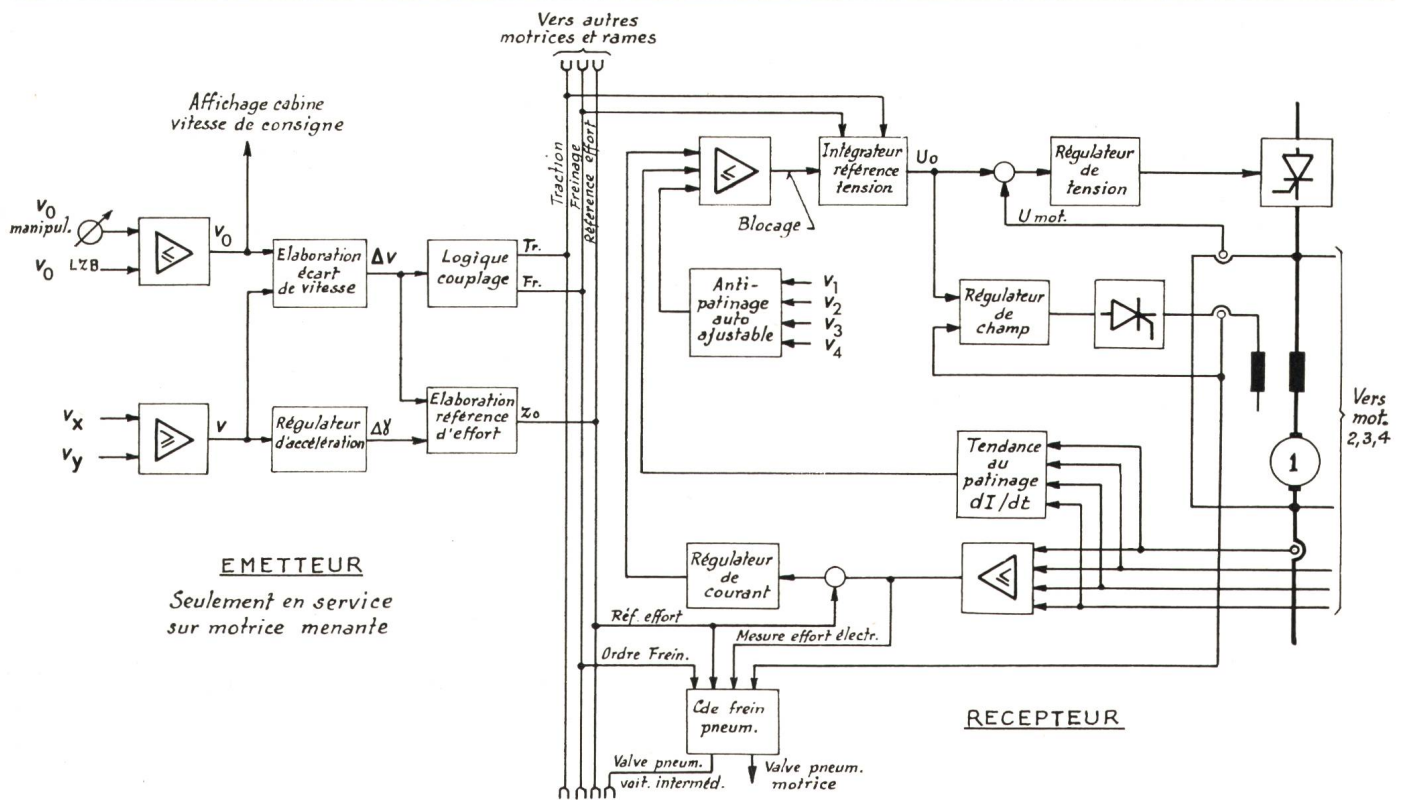


Fig. 10 Schéma synoptique simplifié

v_0	Référence de vitesse	$\Delta\gamma$	Ecart d'accélération
v_x, v_y	Vitesses réelles	Z_0	Référence d'effort
v	Vitesse résultante	v_1-v_4	Vitesse de rotation des essieux moteurs
Δv	Ecart de vitesse	U_0	Référence de tension

L'application des nouvelles techniques à mettre en œuvre tant dans la construction des véhicules que pour la réalisation de l'équipement électrique permet une économie de poids telle qu'il devient possible de réaliser des rames à hautes performances et ne comportant que les $\frac{2}{3}$ ou la moitié d'essieux moteurs. La puissance à fournir par l'équipement électrique est essentiellement déterminée par les accélérations en marche et les décélérations en freinage.

Etant donné la répétition fréquente des cycles de marche caractéristiques d'un service de banlieue et l'importance de respecter l'horaire constitué pour une majeure partie des temps de mise en vitesse et de ralentissement, les fonctions principales de conduite peuvent être prises en charge par des équipements électroniques tels que nous l'avons décrit, et ceci jusqu'à un optimum pouvant inclure la marche automatique des trains. L'utilité de ces dispositifs est particulièrement visible dans l'augmentation de la sécurité et de la densité du trafic qu'ils entraînent sur les réseaux existants.

Ces développements en matière de transports ferroviaires sont possibles grâce à l'étroite collaboration des entreprises d'exploitation et de l'industrie dont la contribution permet de répondre aux impératifs de transport des grands centres.

Bibliographie

- [1] P. Winter, H. H. Weber et R. Germanier: Considérations techniques et économiques à propos de la construction des rames automotrices de banlieue aux Chemins de fer fédéraux suisses. Rail International 4(1973)2, p. 279...296.
- [2] A. Portefaix et R. Boileau: Le matériel roulant des transport suburbains. Programme à remplir. Types de solutions. Dispositions techniques retenues par la SNCF. Rail International 3(1972)12, p. 791...827.
- [3] J. Rutschmann und M. Desponds: Die Vororttriebzüge RABDe 12/12 1101—1120 der SBB. Schweiz. Bauzeitung 85(1967)22, S. 377...393.
- [4] P. Winter: Netzverhalten von Wechselstrom-Triebfahrzeugen mit Mehrfach-Folgesteuern in Stromrichterspaltung. Glasers Annalen 97(1973)2/3, S. 87...96.
- [5] H. H. Weber: Untersuchungen und Erkenntnisse über das Adhäsionsverhalten elektrischer Lokomotiven. Schweiz. Bauzeitung 83(1965)48, S. 877...888.

Adresse de l'auteur:

J. C. Schaffner, S.A. des Ateliers de Sécheron, av. de Sécheron 14, Genève.