

METRO DE LILLE

LIGNE n° 1

LES ÉQUIPEMENTS DE TRACTION

2900.

Critères d'études

La réalisation des équipements électriques du Métro de Lille se réfère à des spécifications de nature différente que l'on peut regrouper comme suit :

- exigence de qualité des produits destinés à l'utilisation en service intensif,
- performances dynamiques,
- limites de poids et de dimensions, particulièrement sévères comme on l'expliquera plus loin,
- immunité aussi grande que possible des performances du véhicule aux défaillances pouvant affecter la motorisation, caractéristique qui se chiffre par la « disponibilité » de l'équipement,
- maintenabilité c'est-à-dire non seulement entretien et dépannage rapide en atelier, mais aussi possibilité de diagnostic à partir de PCC, l'absence de conducteur rendant impossible tout diagnostic local.

• Performances dynamiques

Les performances essentielles sont :

accélération maximale	1,3 m/s ² (de 0 à 25 km/h)
décélération maximale	1,3 m/s ² (de 60 à 20 km/h)
variation d'accélération	0,6 m/s ²
vitesse nominale	60 km/h
vitesse maximum (de rattrapage)	80 km/h

La rampe maximale de la ligne est de 7 %. Cette rampe doit être franchissable dans tous les cas de charge même si un incident rend inactive la moitié des équipements de traction. Les performances permettent d'obtenir une vitesse commerciale de 35 km/h sur la ligne du Métro de Lille, soit un temps de parcours de 20 mn entre les stations extrêmes distantes de 12 km.

• Implantation

Le petit gabarit laisse peu de place pour les équipements sous caisse car la présence des barres de guidage réduit encore dans les courbes serrées le volume disponible. Ainsi la moitié seulement de la largeur du véhicule est-elle disponible sous caisse. Dans le sens longitudinal, déduction faite de la place nécessaire aux essieux, aux moteurs de traction et aux compresseurs d'air et réservoirs, il reste une longueur de 4,960 m sur le véhicule HR (sigle adopté pour le véhicule où est implantée la partie contrôle et puissance du hacheur de traction) et de 2,5 m sur le véhicule PA (véhicule où est implanté le pilote automatique). La hauteur est définie par le niveau du plancher diminué de l'affaissement maximum possible en cas de crevaison, défaut de suspension, etc...

Fig. 5 - Roulement

- | | |
|----------------------|---------------------------|
| 1 - Pont | 6 - Roue de guidage |
| 2 - Disque de frein | 7 - Galets d'aiguille |
| 3 - Pnaus | 8 - Traverse d'axeuse |
| 4 - Joint cardan | 9 - Coussin de suspension |
| 5 - Cadre de guidage | |

Le volume sous caisse finalement dévolu aux équipements de traction ressort ainsi :

véhicule HR	4,98 m x 1,05 x 0,570
véhicule PA	2,5 m x 1,05 x 0,570

Le reste des équipements est logé en caisse dans l'armoire en bout du véhicule HR pour les cartes électroniques de commande et sous deux banquettes du véhicule PA pour les batteries (fig. 6)

Déduction faite des moteurs dont le poids unitaire est de 660 kg, la masse de l'équipement de traction, batterie comprise, est de 3 640 kg. Pour atteindre cet objectif, l'aluminium et ses alliages ont été utilisés de façon intensive tant pour les câbles de puissance que pour les ossatures de coffres (voir tableau fig. 6).

• Disponibilité

Le cahier des charges fixe au système un objectif d'assurance de ponctualité. La probabilité pour un passager de ne pas avoir un retard supérieur à 4 mn sur le parcours moyen doit dépasser 0,98. Pour les équipements de traction, cela équivaut à un taux de panne affectant la disponibilité inférieur à une panne pour 600 000 km : le respect de cet objectif a entraîné des choix de schéma et de dimensionnement qui seront explicités par la suite.

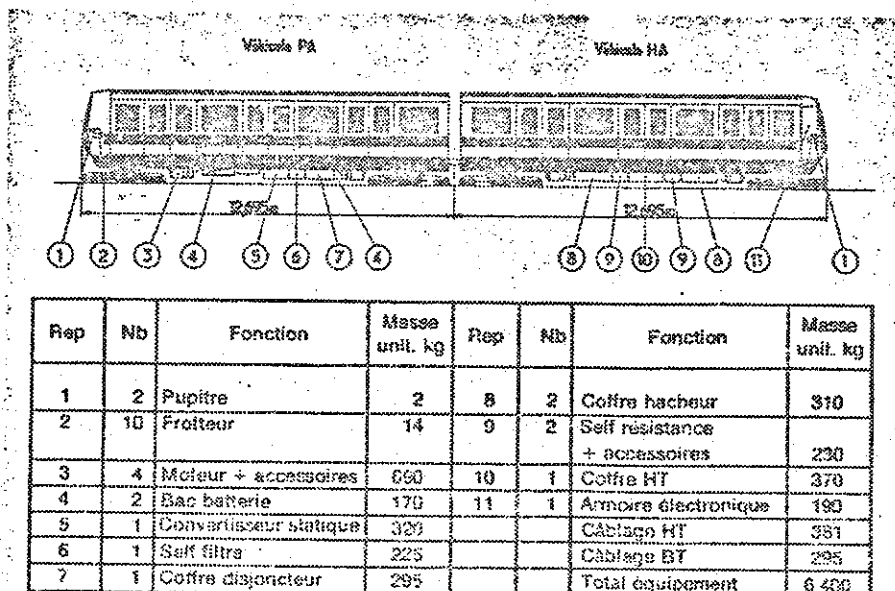
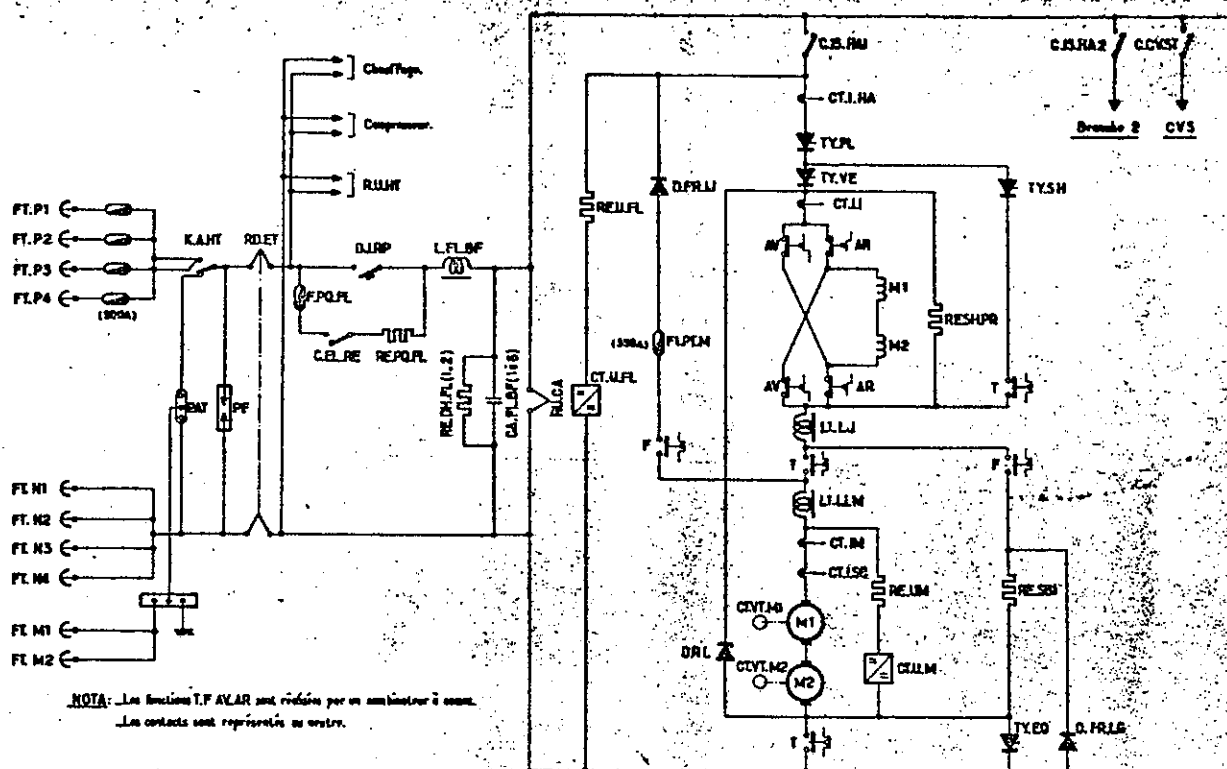


Fig. 6 - Implantation sous caisse du système traction.



NOTA: Les fonctions T.F.A.L.A.R. sont réalisées par un assembleur à commutateur.
Les contacts sont représentés au centre.

TY.VE	Thyristor vernier
TY.SH	Thyristor de shuntage
TY.PL	Thyristor principal
TY.EQ	Thyristor de pré-excitation
RE.U.M.	Résistance du capteur de tension moteur
RE.U.F.L.	Résistance du capteur de tension filtre
RE.SB.PR(1.2)	Résistance de shuntage permanent
RE.SB(1.2)	Résistance de stabilisation
RE.PQ.F.L.	Résistance de précharge du filtre
RE.DH.F.L.	Résistance de décharge du filtre
RD.ET	Relais différentiel d'entrée
R.U.CA	Relais de mesure tension condensateur
PF	Parafoudre
P.AT	Prise atelier
M(1 à 4)	Moteur
L(1.2) L.I.M.	Self de lissage moteur
L.F.L.B.F.	Self de filtre basse fréquence
L(1.2) L.J.	Self de lissage inducteur
K.A.H.T.	Commutateur d'alimentation haute tension

FT.M(1 et 2)	Frotteur de masse
FT.P(1 à 4)	Frotteur positif
FT.N(1 à 4)	Frotteur négatif
F(1 à 4) FT.P	Fusible frotteur positif
F(1.2) PT.M	Fusible protection moteur
F.PQ.F.L.	Fusible précharge filtre
D.J.R.P.	Disjoncteur rapide
D.R.L.	Diode de roue libre
D.F.R.L.G.	Diode de freinage ligne
D.F.R.L.J.	Diode de freinage série inductifs
CT.VT.M(1 à 4)	Capteur de vitesse moteur
CT.U.M.	Capteur de tension moteur
CT.U.F.L.	Capteur de tension filtre d'entrée
CT.I.S.C.	Capteur de sécurité
CT.I.M.	Capteur de courant moteur
CT.I.I.	Capteur de courant inducteur
CT.I.H.A.	Capteur de courant hacheur
C.I.S.HA1.2	Contacteur d'isolement hacheur
C.E.L.RE	Contacteur d'élimination de RE.PQ.F.L.
C.CV.ST	Contacteur du convertisseur statique
C.A.F.L.B.F.	Condensateur filtre basse fréquence

Fig. 7 - Schéma de distribution HT et de puissance.

Réalisation des équipements

Les paragraphes suivants présentent les choix de schéma et de technologie qui ont permis de respecter les contraintes ci-dessus.

• Schéma de puissance (fig. 7)

Chaque voiture est munie de deux moteurs (fig. 8) courant continu à excitation série, contrôlés par deux hacheurs à fréquence fixe.

La captation en courant continu 750 V est assurée par quatre paires de frotteurs latéraux s'appuyant sur les barres de guidage, chaque frotteur positif étant muni d'un fusible à haut pouvoir de coupure. La distance entre les frotteurs extrêmes permet de franchir les appareils de voie sans discontinuité de la captation, y compris au courant maximal pour lequel chacun d'eux est dimensionné. Les frotteurs positifs sont reliés au disjoncteur courant continu ultra-rapide UR12 SECHERON (courant nominal 1 200 A, pouvoir de coupure 30 kA, temps de coupure sur déclenchement ultra-rapide 5 ms) qui assure l'alimentation des circuits de traction et du convertisseur statique.

Le circuit de traction est constitué d'un filtre unique suivi de deux hacheurs alimentant chacun deux moteurs. Le rôle du filtre est multiple : absorber les harmoniques engendrés par les hacheurs pour que le réseau H.T. et les dispositifs de liaison véhicule-voie ne soient pas perturbés, et assurer au hacheur une certaine immunité contre les variations rapides de tension réseau ; cela amène à choisir une fréquence fixe de hacheur, multiple de la fréquence du réseau industriel et aussi élevée que possible, compte tenu des pertes admissibles dans les semi-conducteurs de puissance. La fréquence de 300 Hz par hacheur étant retenue, soit 600 Hz vu du réseau en raison d'un déphasage entre les hacheurs, les contraintes de volume et de poids permettent de définir un filtre L, C donnant une fréquence de coupure inférieure à 75 Hz.

Chaque hacheur, alimenté par un contacteur d'isolement, constitue, avec sa commande, un ensemble indépendant, dimensionné pour pouvoir assurer seul l'entraînement de l'élément en cas d'incident affectant l'autre hacheur : ainsi la redondance des équipements de traction permet d'obtenir le niveau de disponibilité prescrit.

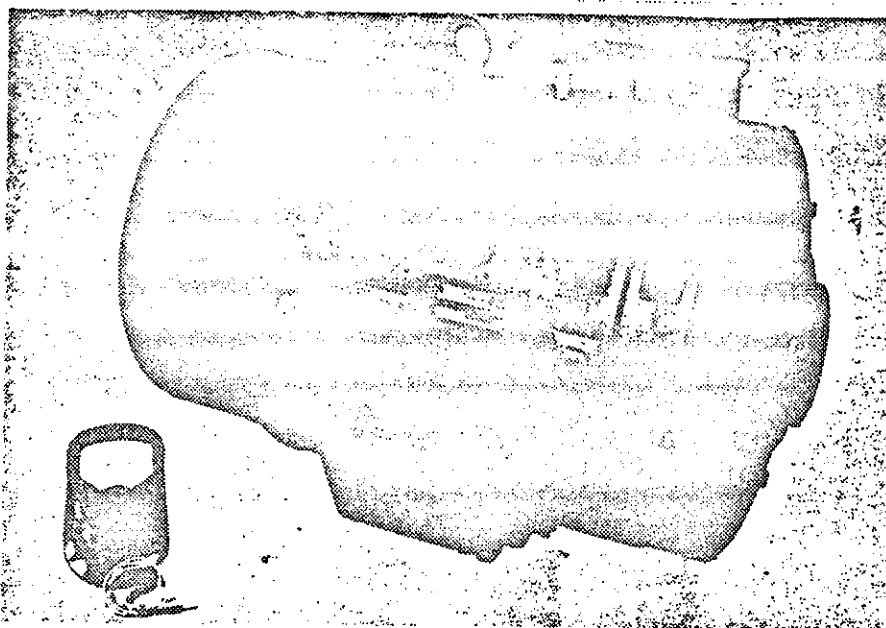


Fig. 8 - Moteur de traction 4 ELG 233D.
Régime unihoraire $U = 720 \text{ V}$
 $I = 400 \text{ A}$ $N = 1520 \text{ tr/mn}$.
Stator isolé classe F et rotor isolé classe H.

Le hacheur

Les caractéristiques électriques principales de chaque hacheur sont :

- courant maximal hacheur (valeur moyenne) 550 A
- variation de tension aux bornes de filtre d'entrée en fonctionnement normal 450 à 900 V
- tension maximale du filtre d'entrée en régime transitoire ... 1 200 V
- limites d'angle d'ouverture du hacheur $2.10^{-2} < \alpha < 0.95$
- fréquence de hachage 300 Hz soit $T = 3.33 \text{ ms}$

Les modifications nécessaires dans le circuit de puissance pour réaliser les commutations traction-freinage ainsi que l'inversion du sens de marche sont assurées par un combinatoire à cames avec servo-moteur.

• Traction

En phase traction (fig. 9a), le hacheur est utilisé en abaisseur de tension puisqu'il est disposé en série avec les moteurs de traction.

L'inducteur et l'induit de chaque moteur sont alimentés en série et de ce fait les courants d'induit (J) et inducteur (I) ont la même valeur lors du démarrage ; toutefois, pour réduire l'ondulation du courant dans les inducteurs à une amplitude acceptable il est nécessaire d'ajouter en parallèle une résistance de « shuntage permanent » (RE.SH.PR) pour écouler la composante alternative. Sa valeur conduit à un taux de shuntage permanent égal à 8 % et une ondulation du courant inducteur inférieure à 3 % de ce courant.

Après la période de démarrage, le réglage du flux d'inducteur est indispensable pour augmenter la vitesse du moteur au-delà de sa vitesse de définition. Le réglage est réalisé par l'adjonction du circuit de shuntage d'inducteur constitué par le thyristor TY-SH en parallèle sur les inducteurs.

• Freinage

En phase freinage (fig. 9 b) les moteurs travaillent en génératrice et débitent, soit dans le réseau, soit dans leurs inducteurs auto-excitateurs, soit dans les deux circuits simultanément suivant la vitesse de l'élément (donc des moteurs) et l'état du hacheur (bloqué ou non).

Le réservoir d'énergie magnétique est constitué par la self de lissage L. LI. M et la self propre à l'induit. La diode D. FR. LG empêche les capacités du filtre CA. FL. BF de se décharger dans le circuit inducteur lorsque le hacheur est passant.

Dans les premiers instants du freinage, il est nécessaire de prémagnétiser le circuit inducteur. C'est le rôle du thyristor de préexcitation (TY. EQ) qui est commandé en synchronisme avec le hacheur. Cette préexcitation, assurée par la tension ligne, cesse dès que le courant dans les inducteurs est suffisant. Pendant cette phase de préexcitation, la diode D. FR. IJ empêche le fonctionnement en « moteur » des moteurs de traction.

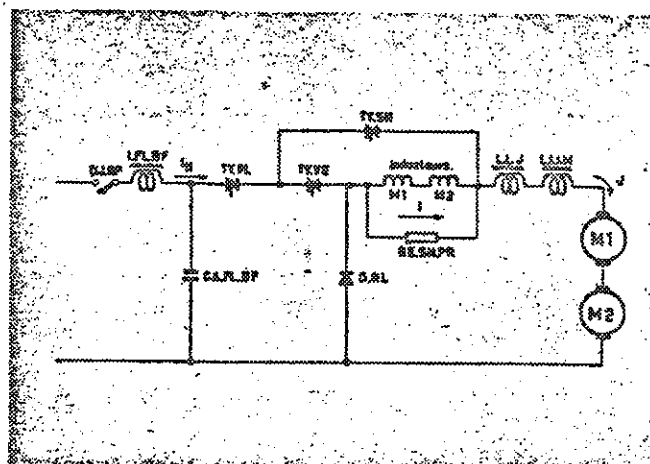


Fig. 9a - Schéma en mode traction.

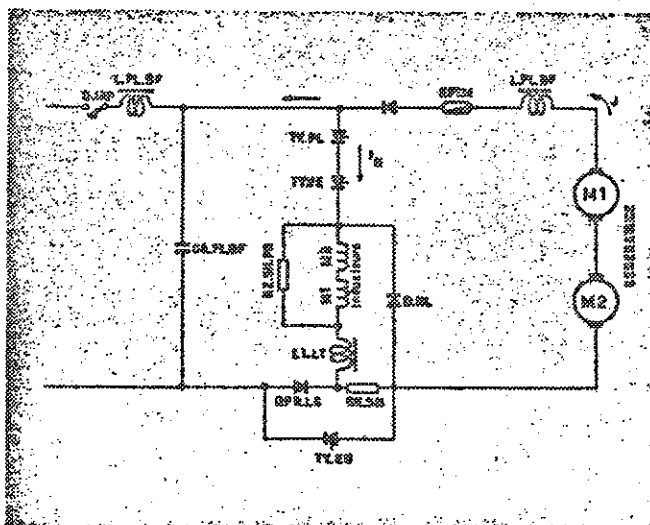


Fig. 9b - Schéma en mode freinage.

La résistance de stabilisation RE.SH, outre la stabilité qu'elle amène aux fonctionnements à vitesse élevée (supérieure à la vitesse de définition du moteur) assure une désexcitation directe des moteurs en cas d'augmentation anormale du courant de freinage ce qui facilite l'intervention des dispositifs de protection (fusible F.P.T.M).

La tension moteur pouvant être égale ou supérieure à la tension ligne, la puissance de freinage électrique est ainsi maximale ; aux basses vitesses la stabilité amenée par les asservissements permet le freinage électrique jusqu'à 3 km/h.

• Asservissements

L'étude des asservissements des hacheurs est délicate car ce sont des systèmes discrets, variables et très fortement non linéaires.

L'étude dans le mode traction se fait de façon classique et relativement simple : elle permet de définir les réseaux correcteurs qui assurent le contrôle de l'angle d'ouverture du hacheur en fonction de l'état du système et des ordres reçus.

L'étude du schéma dans le mode freinage se révèle plus difficile : trois types de fonctionnement existant alors (abaisseur, élévateur, discontinu), chacun nécessitant un réseau correcteur différent. Le schéma d'asservissement finalement retenu comporte ainsi dans la boucle du courant induit ces trois réseaux correcteurs : un circuit discriminatoire définit le mode de fonctionnement et met en service le réseau correspondant ; les sorties des deux autres réseaux sont, elles, asservies au premier pour assurer la continuité lors des transitions.

• Evolution des grandeurs pendant un cycle démarrage-freinage

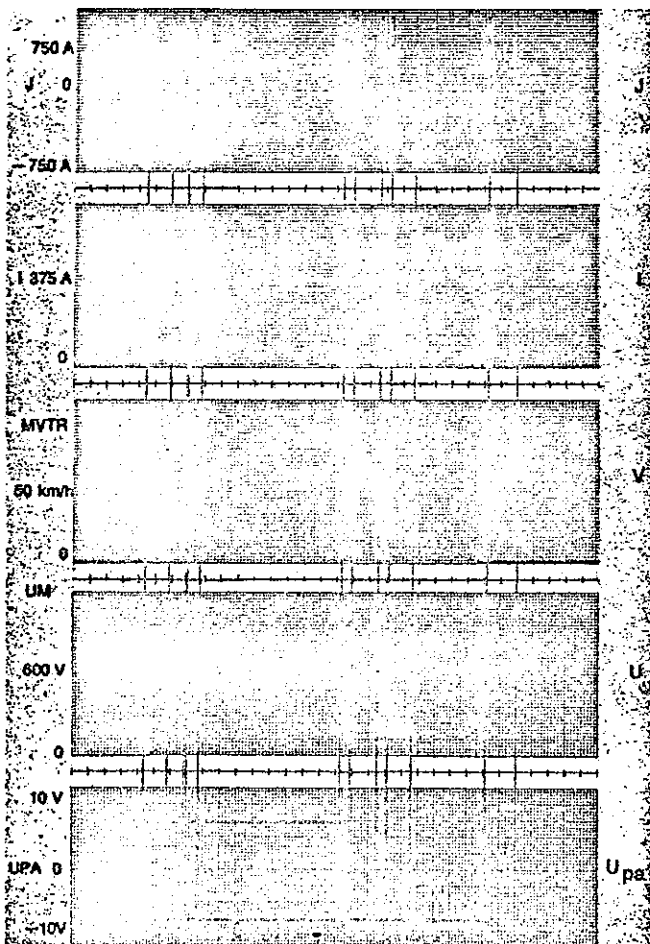
L'enregistrement (fig. 10) des grandeurs J.I.V.U. illustre ce qui précède.

Première phase : accélération

- la consigne d'effort étant donnée, le courant commence à croître en tenant compte de la limitation dy/dt (zone 1),
- les courants I et J atteignent alors leur valeur maximum (550 A) qui est maintenue tant que la tension du moteur le permet (zone 2),
- une fois atteinte la tension maximale des deux moteurs en série, le courant dans l'inducteur diminue jusqu'à ce que le champ restant atteigne sa valeur minimum 0,41,

Fig. 10 - Enregistrement des grandeurs caractéristiques pendant un cycle démarrage-freinage.

J : courant induit
I : courant inducteur
V : Vitesse moteur
U : Tension moteur
 U_{pa} : consigne pilote automatique



- à ce point le moteur se trouve sur sa caractéristique naturelle, le rôle du hacheur se réduisant à garantir le taux de shuntage ($I/J > 0,41$) (zone 4).

Deuxième phase : freinage

A réception de l'ordre de freinage (U_{pa} négatif) le hacheur est inhibé, puis après contrôle du courant nul, le circuit est modifié et passe en configuration freinage. Après la vérification du circuit, le hacheur entre à nouveau en fonctionnement (zone 5). La tension aux bornes du moteur remonte jusqu'à la tension ligne, le courant induit étant limité à la valeur maximum de 450 A, le courant inducteur étant fonction de la vitesse du moteur et de la tension ligne (zone 6).

A partir d'une certaine vitesse, le moteur ne peut développer à ses bornes une tension égale à celle du filtre : le hacheur fonctionne alors en élévateur jusqu'au décrochement (zone 7 et 8).

• Distribution Basse Tension

L'ensemble des auxiliaires est alimenté en basse tension continue sauf le moteur de compresseur d'air ; cette disposition simple permet une économie de poids et de volume. Les spécifications et les conditions d'emploi des moteurs à courant continu pour la ventilation de l'équipement ont été définies pour obtenir une bonne disponibilité et un entretien réduit.

La conversion du courant continu 750 V (+ 20 % — 30 %) en basse tension continue est assurée par un convertisseur statique du type onduleur direct à thyristors (fig. 11). Sa puissance est de 13,5 kW à la tension nominale de 85 V. Les utilisations de cette tension sont l'électronique de contrôle des hacheurs et de conduite du train, les ventilateurs de renouvellement d'air et de circulation d'air chaud, ceux des coffres hacheurs et convertisseurs, la charge batterie, l'éclairage et le relaiage des services auxiliaires (fig. 12).

Comme indiqué sur le schéma, la batterie est raccordée au réseau BT par l'intermédiaire d'un chargeur embarqué qui assure un état de charge optimal. En cas de défaillance du convertisseur statique la tension du réseau BT passe de 85 V à 72 V et certaines servitudes sont délestées : le fait que la batterie soit toujours chargée permet d'effectuer dans ces conditions un aller-retour de la ligne soit un temps de 40 mn.

• Principaux choix technologiques

- Les semi-conducteurs sont montés unitairement ou par paire suivant leur taille dans des « modules » (fig. 13a) dont la mécanique est la même pour toutes les fonctions du hacheur (fig. 13b) et du convertisseur statique. Leur raccordement dans le coffre se fait par barre de cuivre isolée. Ils sont déconnectables non débrochables ; en effet, le faible taux de panne constaté des composants de puissance ne justifiait pas des modules débrochables.

- La ventilation des coffres hacheur et convertisseur est assurée par des moto-ventilateurs à courant continu montés dans les coffres même. L'air frais, prélevé sur leurs faces latérales, est ensuite utilisé pour le refroidissement des selfs de filtre et le lissage moteur.

- L'électronique utilise des composants de technologie CMOS montés sur des cartes 3 U.

- Le relaiage de contrôle est assuré par des relais scellés à faible consommation du type aéronautique. Il a ainsi pu être aussi réalisé sur des cartes 3 U.

- La consommation de l'électronique de commande des deux hacheurs est de 200 W, ce qui autorise une armoire non ventilée.

Une autre possibilité pour le refroidissement : le R 113*

En mai 1981, un élément du Métro de Lille a été équipé d'un hacheur prototype refroidi au R 113 suivant le principe de refroidissement bi-phasé (liquide, vapeur) ; les avantages de ce principe sont maintenant bien connus : gain de volume, aptitude à la surcharge, non-pollution des composants [3]. Ils sont particulièrement appréciables pour un véhicule à petit gabarit.

L'élément ainsi équipé a participé aux essais d'endurance du matériel roulant de série : sa bonne tenue pendant cette période a confirmé la justesse des choix technologiques faits.

* R 113 ou F 113 : Forane, Fréon ou Flugène

Appellations de marques du Trifluorotrchloroéthane.

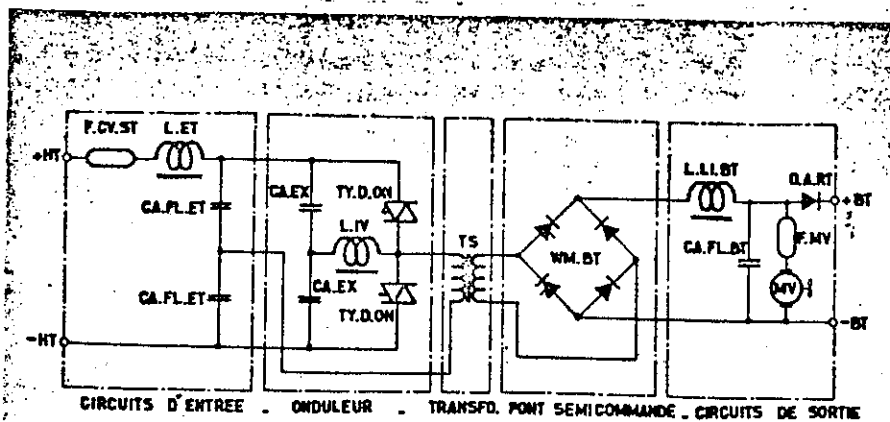


Fig. 11 - Schéma de principe du convertisseur statique.
 F.CV.ST : fusible
 L. ET, CA.FL.ET : Inductance et condensateur du filtre d'entrée
 CA. EX : Condensateur d'extinction
 L. IV : Self d'inversion
 TY.D.ON : Thyristor diode de l'onduleur d'entrée
 TS : Transformateur
 WM. BT : Pont semi-contrôlé
 L.LI.BT, CA.FL.BT : Inductance et condensateur du filtre de sortie
 MV, F.MV : Motoventilateur et fusible
 D.A.R.T : Diode anti-retour.

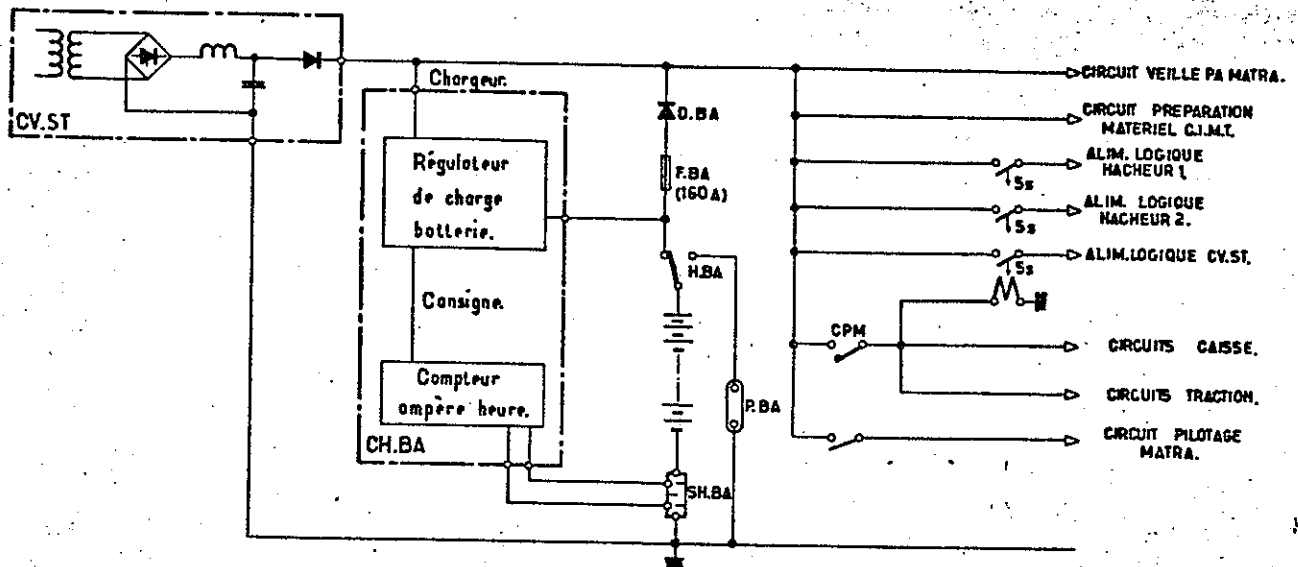


Fig. 12 - Schéma de distribution Basse Tension

D.BA, F.BA, H. BA, SH.BA, P. BA : Diode, fusible, inverseur, shunt prise batterie.

CH.BA : chargeur de batterie embarqué
 CPM : contacteur de préparation matériel.

Fig. 13a - Module de puissance « TY.CX », « TY.EQ ».

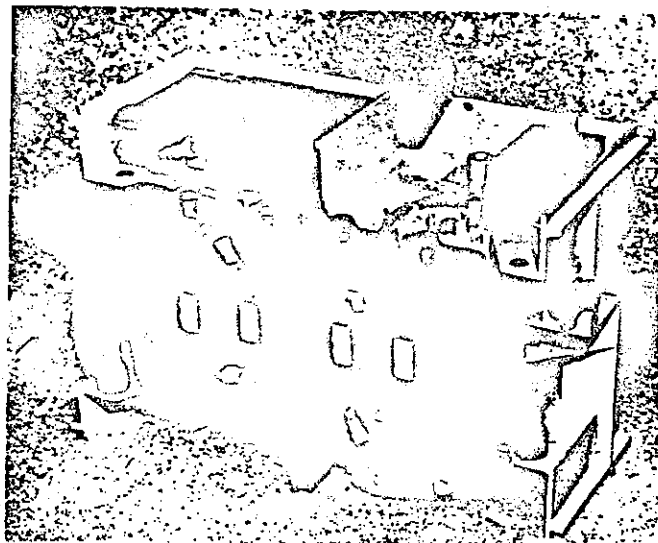
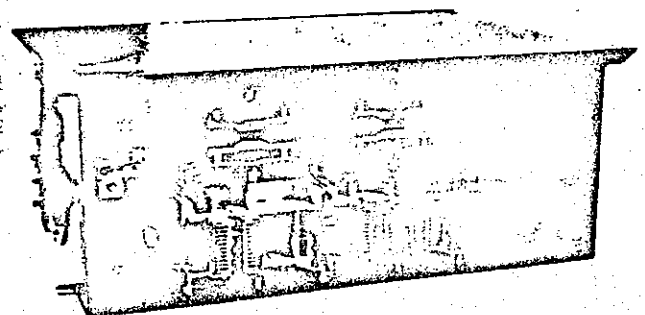


Fig. 13b - Coffre hacheur.



CONDUITE

On ne citera que pour mémoire la présence d'un pupitre de commande manuelle pour présenter plus longuement le principe des automatismes dont les contraintes principales sont :

- l'absence de personnel à bord qui impose un niveau élevé de fiabilité et de sécurité,
- l'intervalle des trains inférieur à 1 mn pour un temps d'arrêt de 30 s,
- une précision d'arrêt en station meilleure que 30 cm,
- l'absence d'une voie fer qui conduit pour la détection des trains à un autre concept que celui de « circuit de voie ».

L'analyse des fonctionnements du métro permet de définir une liste des fonctions à assurer :

- détection de la position des trains,
- contrôle de vitesse et commande d'arrêt des trains,
- conduite automatique.

La voie étant découpée en cantons, on contrôle la position des trains par détection négative et positive.

Les défauts majeurs détectés par la logique associée à ces signaux, entraînent l'arrêt d'urgence par coupure de la « fréquence de sécurité » normalement émise tout au long de la voie.

Tout au long de la ligne, est disposé un « tapis » où sont implantés les lignes d'émission et de réception : une première ligne de transmission bifilaire munie de croisements équitemps correspondant au programme normal de vitesse du tronçon, et une deuxième ligne de même type correspondant au programme d'arrêt que doit respecter un train lorsque le canton suivant est occupé. Des antennes suspendues sous le véhicule détectent le mode normal ou perturbé et les croisements de lignes qui définissent le programme de vitesse (fig. 14).

Les régulations d'horaire et d'intervalle s'effectuent par contrôle de l'écart de temps au passage d'une balise passive. Un trop grand écart d'une rame entraîne un décalage d'horaire des autres rames qui augmentent alors leur temps d'arrêt en station jusqu'à rattrapage du retard par le véhicule concerné.

EXPLOITATION DU MATÉRIEL ROULANT

A l'achèvement de la ligne, le trafic annuel, chiffré en kilomètres parcourus par l'ensemble des éléments, sera de 5 millions d'éléments-km soit environ 130 000 km/an/élément. Les paragraphes suivants présentent la gestion du trafic en ligne et la maintenance du matériel roulant en atelier.

GESTION DU TRAFIC

Au poste central de contrôle (PCC fig. 15) sont regroupés les moyens d'action et les informations qui permettent aux « opérateurs PCC » d'assurer la gestion du trafic (un à cinq opérateurs en fonction du trafic) : leurs interventions normales sont la mise en route et l'arrêt de la ligne, l'injection et le retrait des véhicules en fonction des besoins du trafic.

En cas d'incident, ils peuvent, après examen des informations disponibles, agir par télécommande sur les automatismes embarqués pour commander la commutation entre équipements en redondance ou donner l'ordre d'accostage-poussage ou prendre toute autre décision appropriée. Seuls certains incidents très rares peuvent justifier la reprise en contrôle manuel par un agent itinérant dépêché sur place.

MAINTENANCE DES ÉQUIPEMENTS DE TRACTION

La première et la deuxième phase du marché avaient pour objet la réalisation d'un prototype puis la construction des équipements de la ligne n° 1. La troisième phase a pour objet de garantir que les coûts de maintenance ne dépasseront pas l'objectif fixé. Pour cela, TCO a défini les opérations de maintenance préventive (entretien), décrit leur déroulement et l'outillage nécessaire, étudié les conséquences des pannes des composants et sous-ensembles, rédigé en conséquence les notices de maintenance curative (dépannage), défini les outillages spéciaux éventuellement nécessaires, et enfin fait les prévisions de temps et de qualifications nécessaires à ces opérations dans les hypothèses de trafic indiquées ci-dessus.

Le garage atelier

La maintenance des trains est assurée au Garage Atelier où les éléments peuvent être levés sur six « lignes de vérins ». Par comparaison avec les solutions classiques à fosses cette solution permet d'augmenter la sécurité, la rapidité et l'agrément du travail (fig. 16).

Maintenance préventive

Les opérations de maintenance préventive sont :

- Les Petites Révisions (PR) tous les 10 000 km. Les taux d'usure (balais des moteurs à courant continu en particulier) sont mesurés, les filtres d'air sont nettoyés, le bon fonctionnement de tous les composants du hacheur et du convertisseur participant à la sécurité est vérifié.

A chaque 50 000 et 100 000 km des opérations complémentaires sont effectuées (niveau d'eau batterie par exemple).

- Les Révisions Limitées (RL) tous les 300 000 km. Les organes électromécaniques de puissance sont examinés (contacteurs, moteurs de traction). Toutes les fonctions des commandes hacheur et convertisseur sont vérifiées.

- Les Révisions Générales (RG) tous les 600 000 km. Les organes électromécaniques sont déposés et après échange des pièces usées, leurs caractéristiques sont à nouveau vérifiées. Les connexions de puissance sont resserrées. Après remontage, les caractéristiques dynamiques du véhicule sont vérifiées au cours d'un essai en ligne.

Maintenance curative. Les baies de test

La nécessité de dépanner avec rapidité les équipements électroniques a amené à développer des baies de test semi-automatiques des hacheurs et des convertisseurs statiques. La baie de test hacheur (fig. 17) reconstitue, autour de l'armoire de commande, l'ensemble des signaux d'entrée ; l'examen des signaux en retour et leur comparaison avec les valeurs nominales permet de localiser la carte en panne. Cette opération s'effectue en principe en atelier ; certaines pannes peuvent justifier l'envoi du véhicule en ligne, le testeur étant alors branché en « surveillance ». Comme indiqué plus haut, ces baies sont aussi utilisées en entretien préventif, les pannes potentielles sont alors détectées et réparées et le taux de pannes en ligne s'en trouve ainsi réduit.

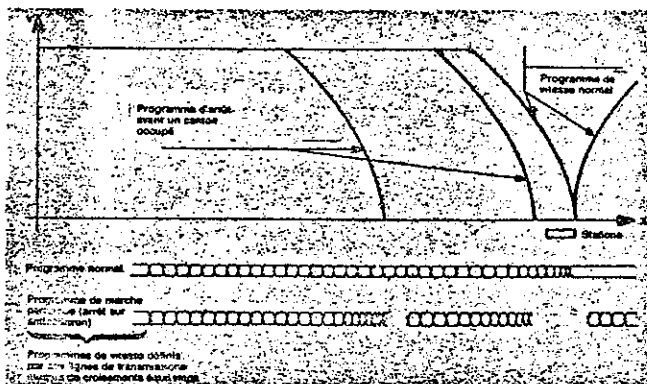


Fig. 14 - Contrôle de la vitesse des rames.

Fig. 15 - PCC, Poste Central de Contrôle (cliché Matra).

