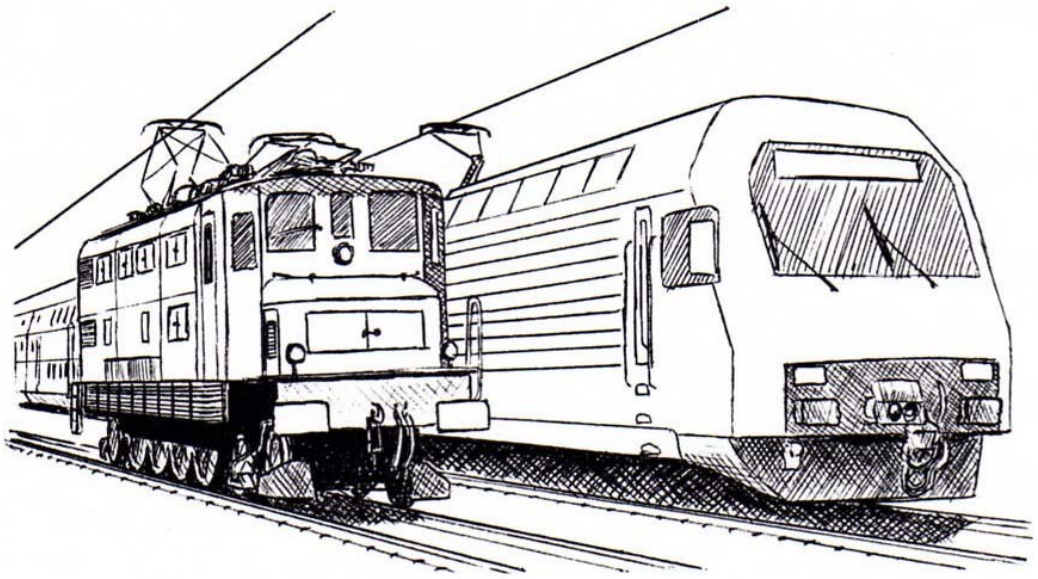
Techniques Ferroviaires



Exercices choisis

Jean-Marc Allenbach

EPFL

LME - Laboratoire de machines électriques

Edition 2014

43* On veut franchir le Gothard (rampes de 27‰) à 80 km/h avec un train marchandises de 650t. On souhaite le remorquer par une Ae 6/6 (fiche 8.3.66).

a Calculer l'effort pour maintenir la vitesse à l'air libre sur la rampe en courbes de 300 m.

b Quel effort l'équipement électrique de la locomotive peut-il développer au démarrage? Quel effort maximal peut-on transmettre à la jante d'une locomotive de 120 t telle la Ae 6/6?

c Si le train doit s'arrêter devant un signal, quelle sera l'accélération maximale au démarrage, puis à 65 km/h? En combien de temps et quelle distance atteindra-t-il 65 km/h?

d Est-il raisonnable de confier un train de cette masse à ce type de locomotive? Quelle est la masse maximale qu'on peut attribuer à cette locomotive sur le Gothard pour cette vitesse?

106* Les JREast ont mis en service deux types de rames bi-niveaux "MAX" à grande vitesse: E1 en 1994 (fiche 8.2.96) et E4 en 1997 (fiche 8.2.16).

A Calculer pour chacune ainsi que pour les Shinkansen 0 (fiche 8.2.3) les valeurs suivantes, rapportée à une place assise: tare, résistance à l'avancement à vitesse maximale, puissance nominale installée et longueur de la rame. Quelles sont les conséquences sur l'exploitation?

B Comparer les solutions électriques des deux rames MAX. Quelles sont les conséquences sur l'exploitation?

66* Quel est l'impact d'un changement de réducteur sur DE 1002 (k_G = 1:4,706), toutes autres choses restant par ailleurs inchangées.

10* Les *Tartarughe* (Fiche 8.3.44) ont été les locomotives des services FS prestigieux dans les années ’70 et ’80. Elles ont en particulier assuré la traction sur la *Direttissima* Florence–Rome dès sa mise en service en 1977.

A Déterminer l’effort de traction d’une E444 (fig. 3.2, courbe 3) pour remorquer en palier un train de 8 voitures *Gran Comfort* (42 t. à vide) à 200 km/h (figure 3.3. courbe 3). Quel cran de traction le mécanicien a-t-il choisi ?

B Quel est le courant appelé à la ligne de contact si on admet qu’elle se trouve à tension nominale ?

C Quel est la densité de courant au niveau de la palette si on admet une largeur d’appui de 4 mm par fil de contact (fig. 11.9 et 11.12, doc. annexe) vers 1980? Un mécanicien a proposé de lever avec les deux pantographes levés pour favoriser la prise de courant : est-ce une bonne idée ?

11* La première ligne à grande vitesse des FS, *Direttissima*, a été mise en service en 1977. Comme l’ensemble du réseau, elle est électrifiée en 3 kV=. Les lignes à grande vitesse plus récentes sont électrifiées en 25 kV 50 Hz. Les FS étudient la conversion de cette ligne en 25 kV.

A Analyser les avantages et inconvénients d’une telle modification.

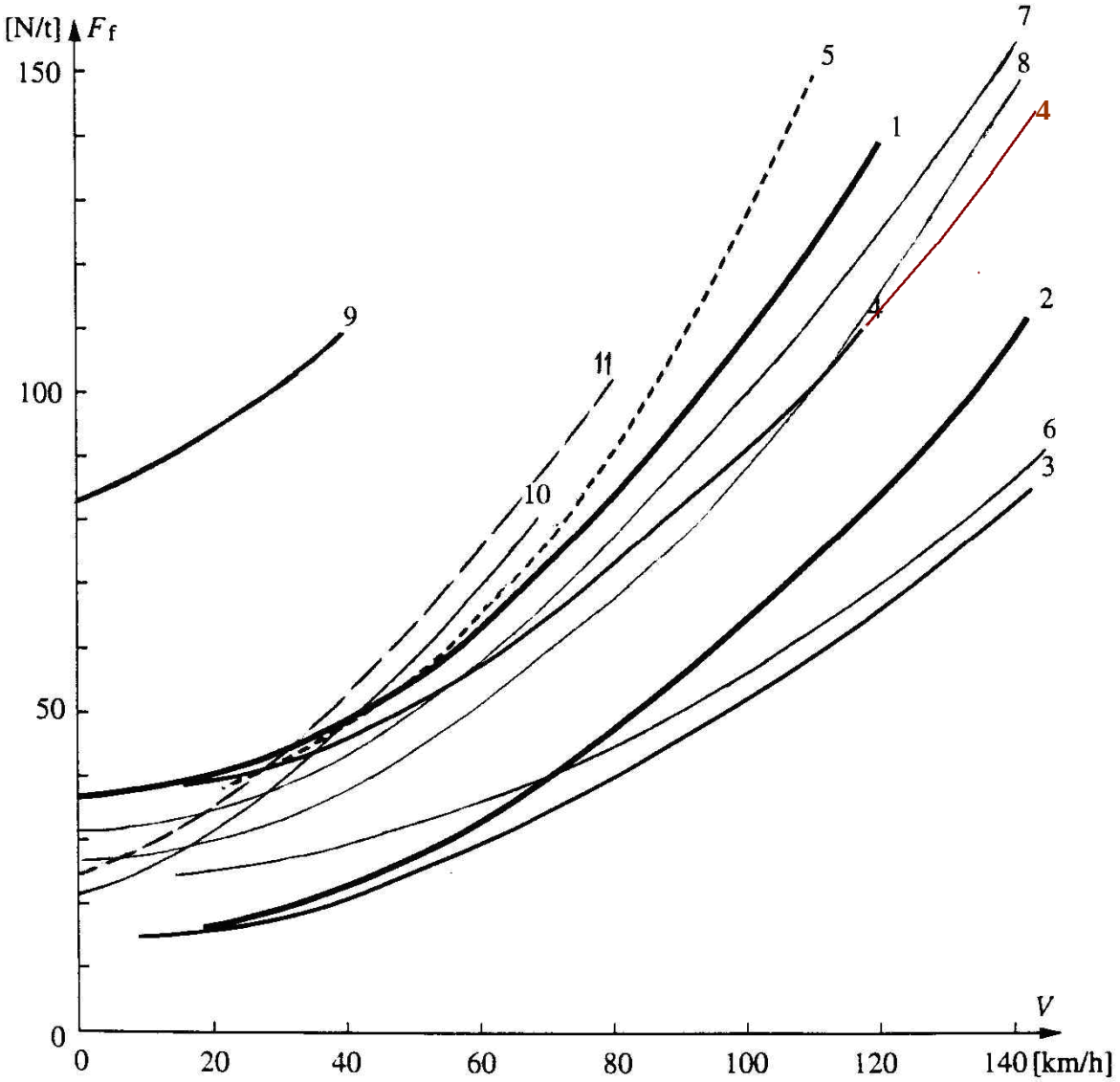
B Evaluer les travaux à effectuer, et leur organisation, de manière à maintenir le trafic sans perturbation.

Pour les corrigés, voir :
https://documents.epfl.ch/groups/t/tr/traction/www/TFtable.htm

43 et 106 :	Chapitre 3
66 :	Chapitre 5
10 et 11 :	Chapitre 11

TECHNIQUES FERROVIAIRES
Documents pour divers exercices

1 locomotive Ae 6/6 (CFF): C_oC_o de 120 t
2 locomotive 9001 (SNCF): BB de 80t
3 locomotive 6001 (SNCF): CC de 120 t
4 locomotives Am 4/6 (CFF) : $1B_oB_o1$ de 93 t, Re 460 (CFF) : B_oB_o de 84 t (——)
5 locomotive 2D2 (PO), ou Dm3 (SJ)
6 locomotive BBB (FS)
7 locomotive Re 4/4 II (CFF) : B_oB_o de 80 t
8 locomotive Re 6/6 (CFF) : $B_oB_oB_o$ de 120 t
9 automotrice BOB (ou MC) en crémaillère
10 automotrice BOB (ou MC) en adhérence
11 automotrice articulée TSOL ou Stadtbahn B



1 Voitures UIC vers 1960 (SNCF, CFF, DB, FS)
2 Voitures Corail 1975 (SNCF), Eurofima 1980 (DB, FS, ÖBB,…) ou VUIV 1985 (CFF)
3 Voitures légères 1940 (CFF)
3 en ajoutant 20 [N/t] Voitures BOB en crémaillère

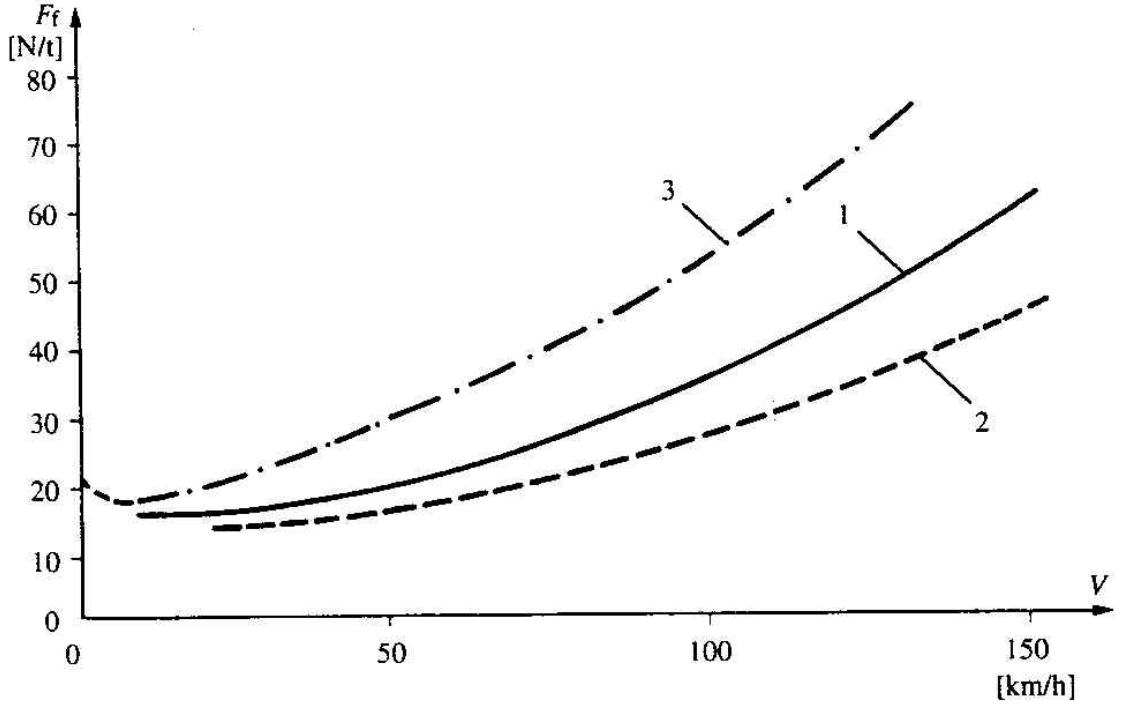
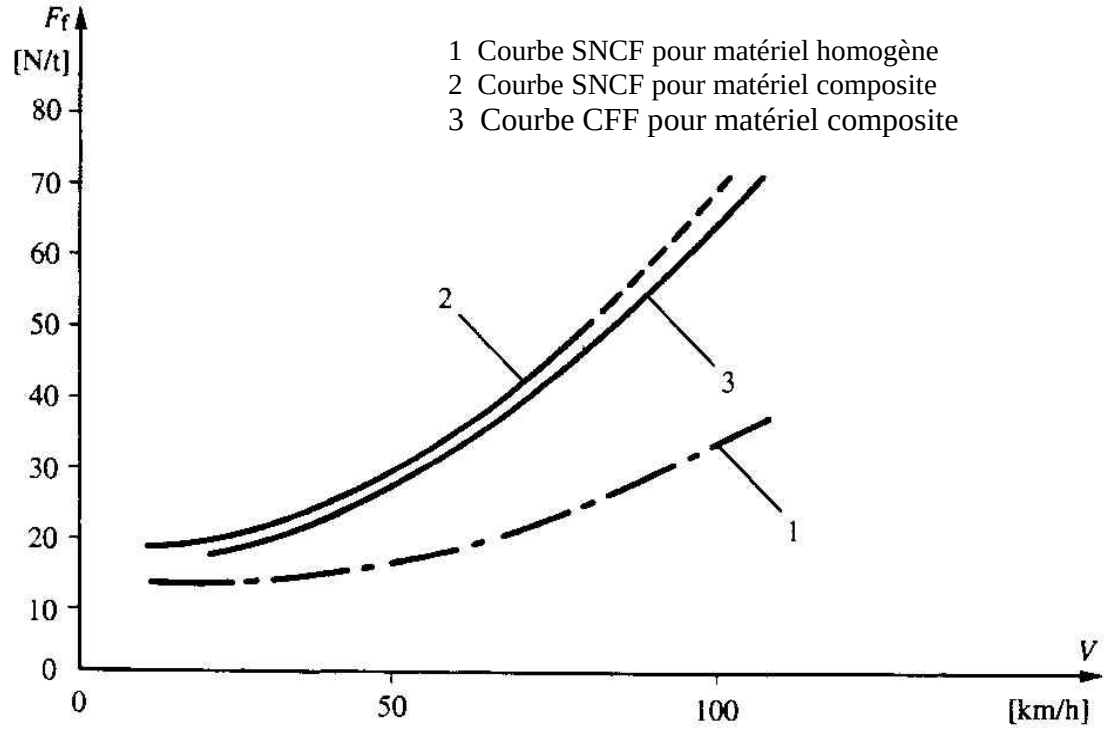


Fig. 3.4 Résistance à l'avancement de convois voyageurs.

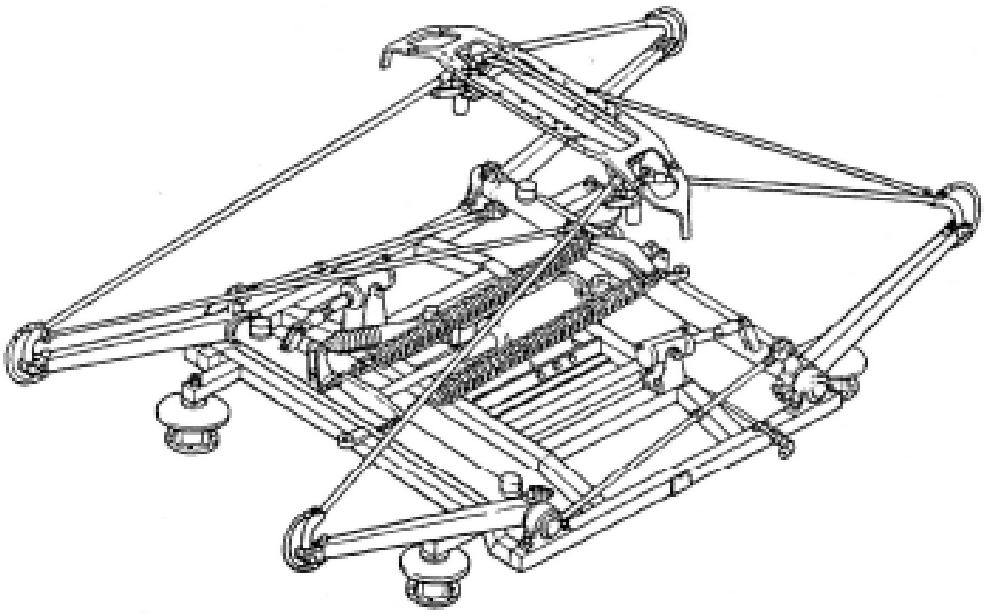


1 Courbe SNCF pour matériel homogène
2 Courbe SNCF pour matériel composite
3 Courbe CFF pour matériel composite

Fig. 3.5 Résistance à l'avancement de convois marchandises.

Ligne de contact 3000V=

Pantographe type 52 équipant les E444



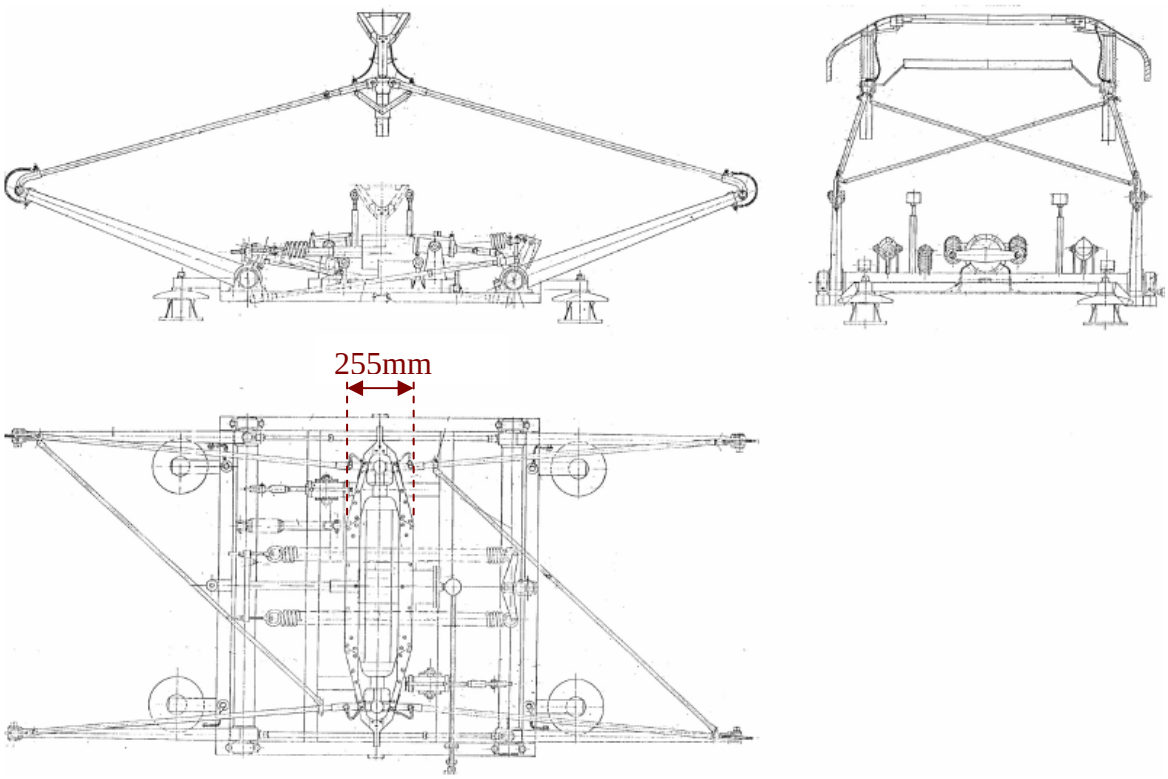
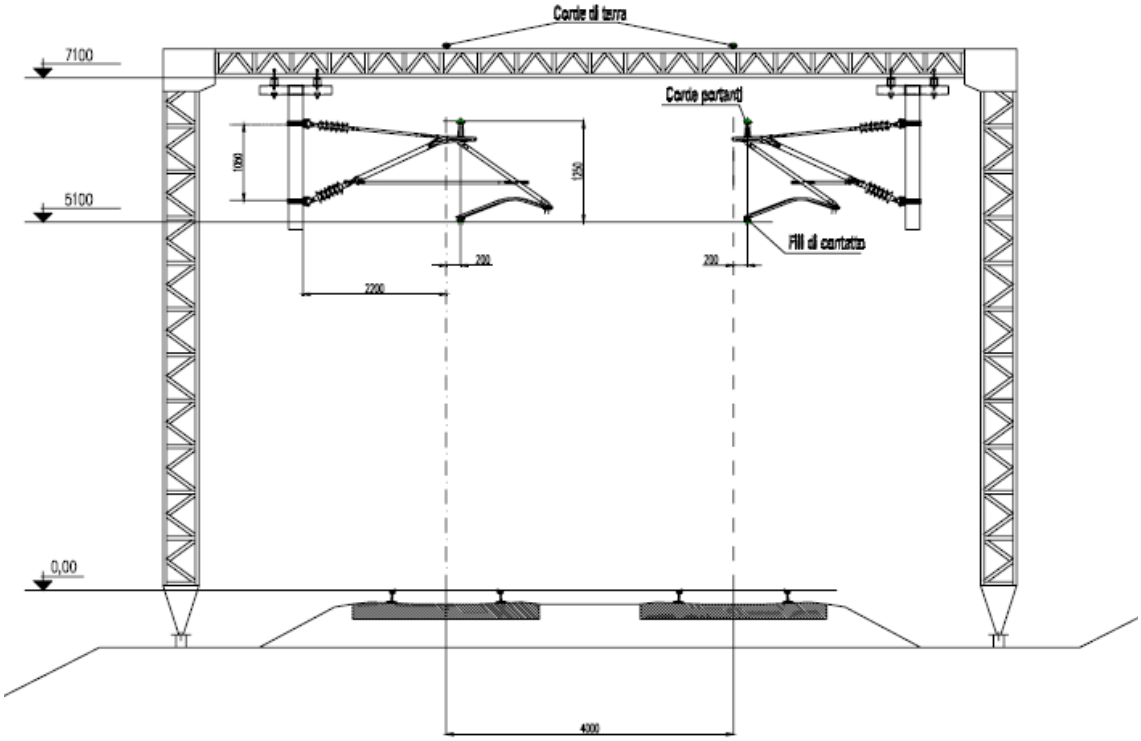


Figura 24 Pantografo tipo 52/92 FS

Bibliographie :

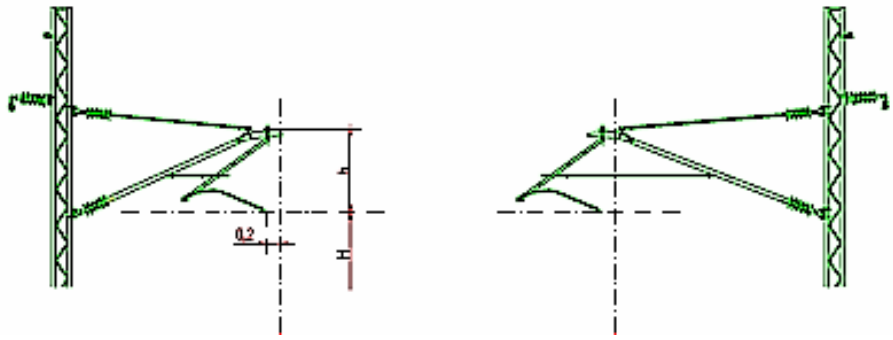
C. BORGIA : *Nell'interazione linea di contatto – pantografo (line alimentate a 3 kV cc)*, Trenitalia, 2000. http://www.stel-web.it/history/aiman/convegno_00-11-15/borgia/borgia.pdf

Ligne de contact FS 3 kV= pour V≤250 km/h



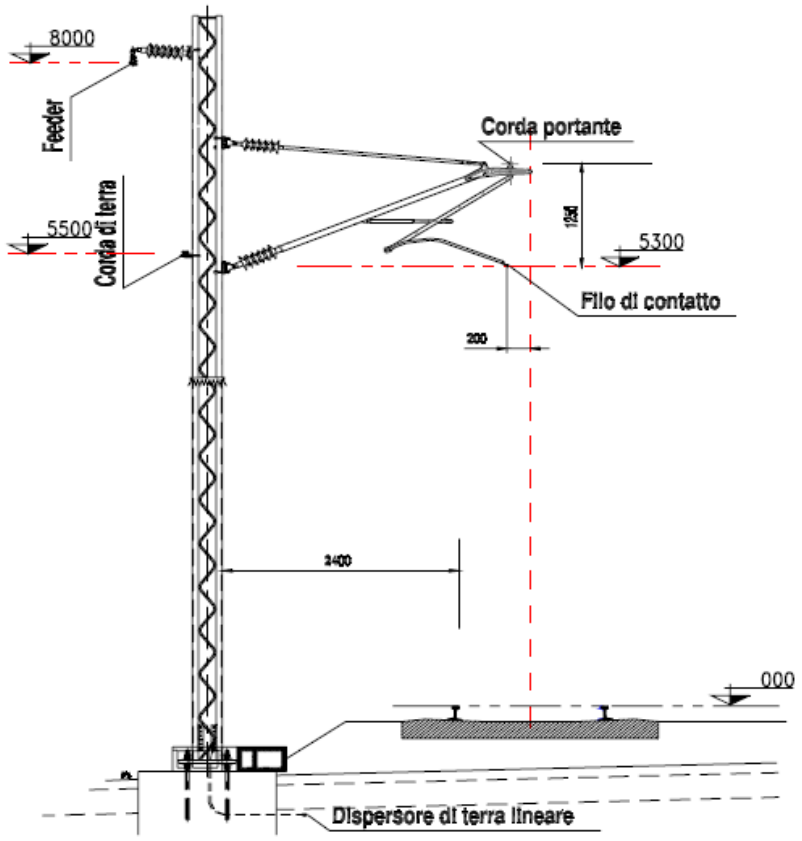
Caratteristiche della linea		Linea di contatto	Corda portante			Fili di contatto		
Velocità massima [km/h]	Intensità del traffico	Sezione del rame [mm²]	numero	sezione [mm²]	tiro [daN]	numero	sezione [mm²]	tiro [daN]
250	Media /Alta	540	2	120	1500	2	150	1875

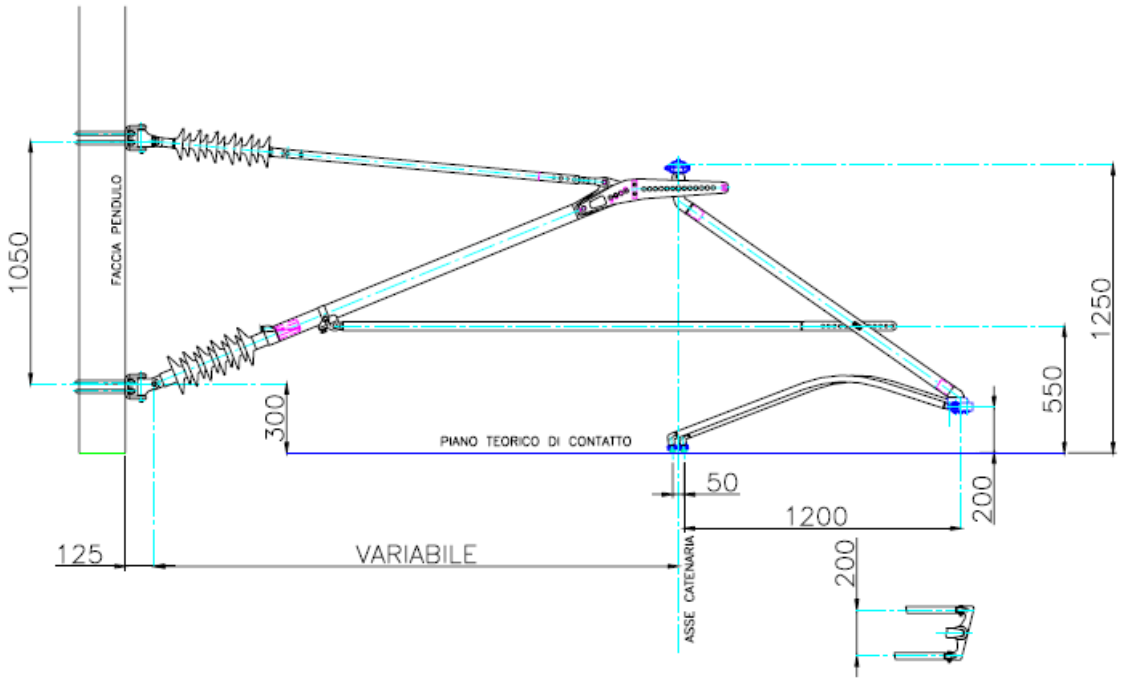
Ligne de contact FS 25 kV 50 Hz pour V≤300 km/h



(détails au verso)

Linea di contatto	Corda portante			Fili di contatto			Feeder alimentato a - 25Kv	
Sezione del rame [mm²]	numero	sezione [mm²] Cu	tiro [daN]	numero	sezione [mm²] Cu	tiro [daN]	numero	diametro [mm] corda Al-acciao
270	1	120	1625	1	150	2000	1	22,8

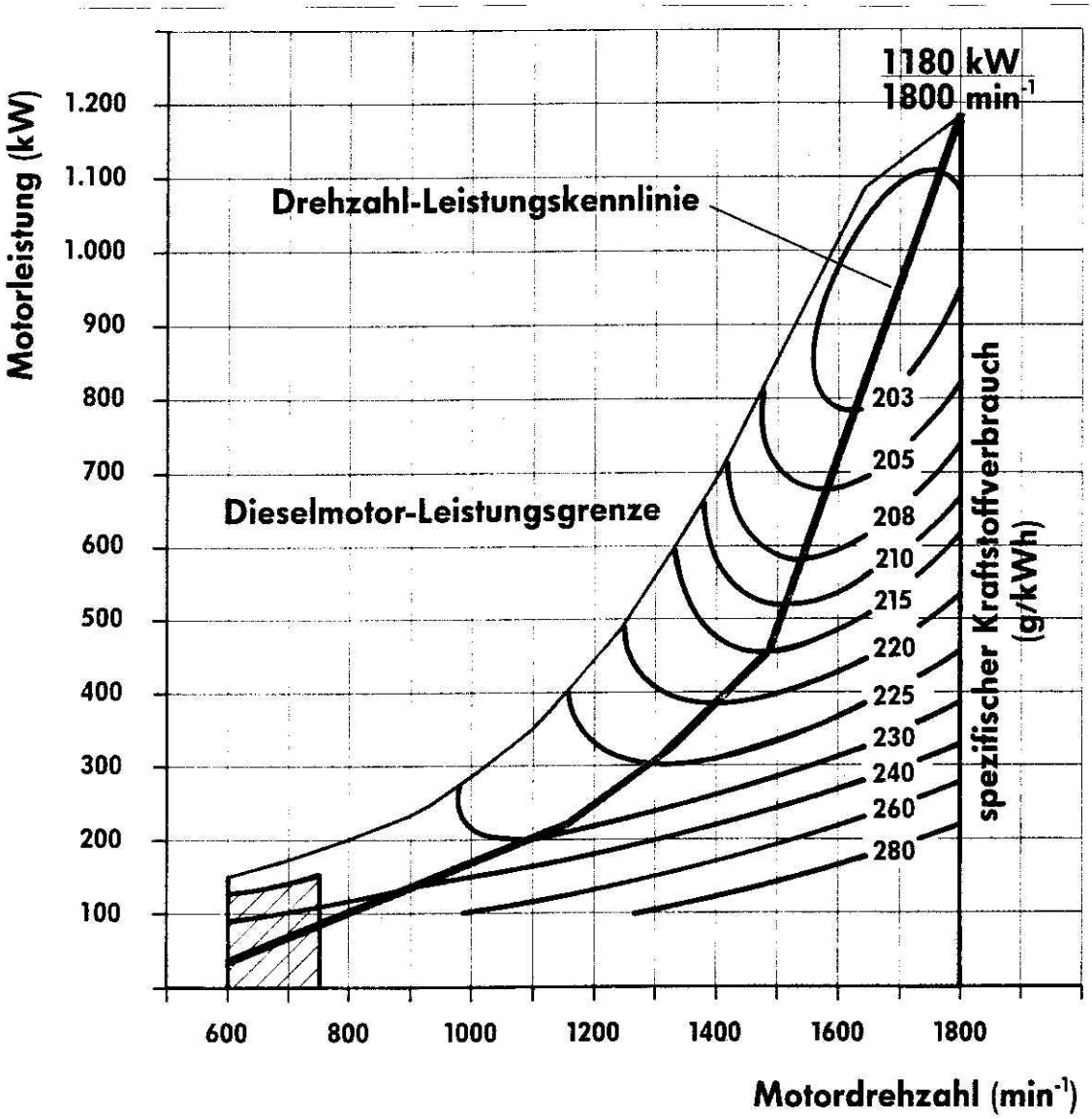




Notes: Dans les deux cas, l'intervalle entre supports (mâts ou portiques) est d'environ 60 m.
Cette première ligne à grande vitesse à une longueur de 230 km.
La vitesse maximale sera maintenue à 250 km/h.

Bibliographie : A. LUZI: *Italian High Speed*, Alta Scuola Politecnica, Milano, nov. 2005.
http://mecsys.mecc.polimi.it/Didattica/asp/Materiale/20051123/Politecnico%20milano.pdf

TECHNIQUES FERROVIAIRES
Document accompagnant la question . 65 à 69.



auxiliaires : $P \cong 50\,kW$ (non permanents)

rendements : génératrice à excitatrice incorporée

$\eta_{gén} = 0,958$

onduleur triphasé

$\eta_{ond} = 0,978$

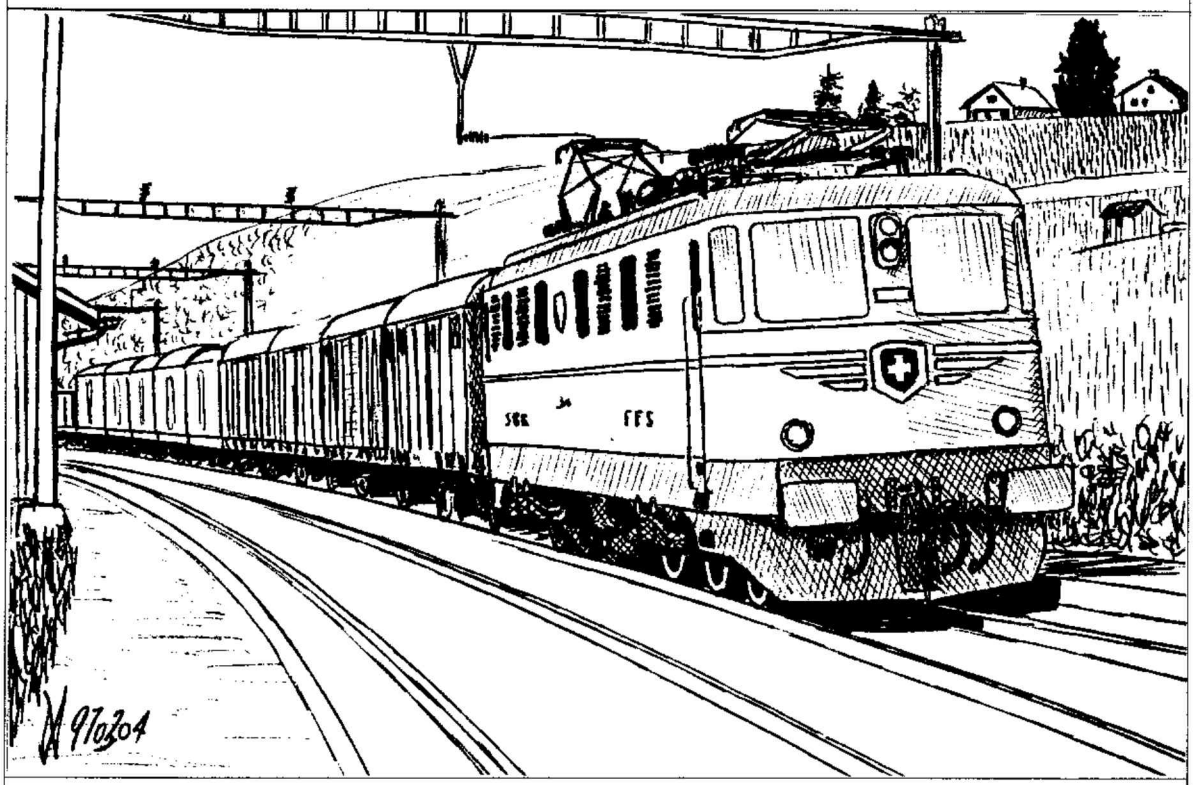
moteur de traction

$\eta_{mot} = 0,932$

transmission

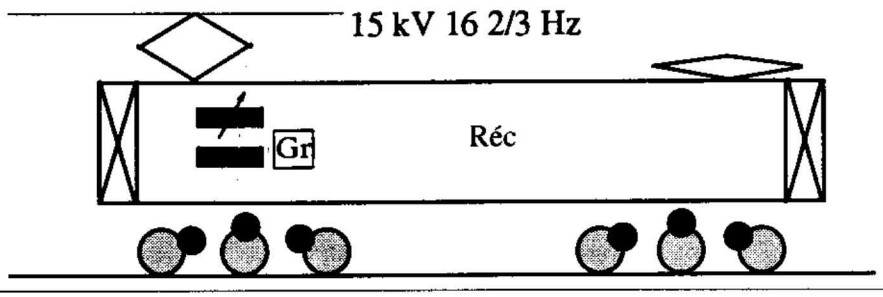
$\eta_G = 0,987$

C_oC_o	**CFF**	**Ae6/6**	8.3.66



Locomotive tous services
Mise en service: 1952 – 1966
Nombre: 120 Immatriculation: 11 401 –11 520
Constructeurs: mécaniciens: SLM
électriciens: BBC
Ecartement: 1435 mm Vitesse maximale: 120 km/h
Masse: 120 t
Effort en régime continu: Z = 184,2 kN à 75,7 km/h

Effort maximal: Z = 392 kN
B = 110 kN
Puissance continue: 3960 kW
Puissance unihoraire: 4416 kW
Diamètre des roues: D_m = 1235 mm Réduction: k_G = 1:2,56
Transmission: *BBC à ressorts*
Frein mécanique: pna



Raison du choix:

Exemple réussi de locomotive puissante à moteurs directs et à adhérence totale.

Remarques :

En traction outre par le courant d'induit, l'effort est aussi limité par le courant primaire au transformateur, entre 40 et 80 km/h (courbe IV en trait mixte). La courbe III donne la caractéristique des moteurs à tension nominale aux bornes. La courbe II exprime les limites estimées de l'adhérence selon Curtius-Kniffler.

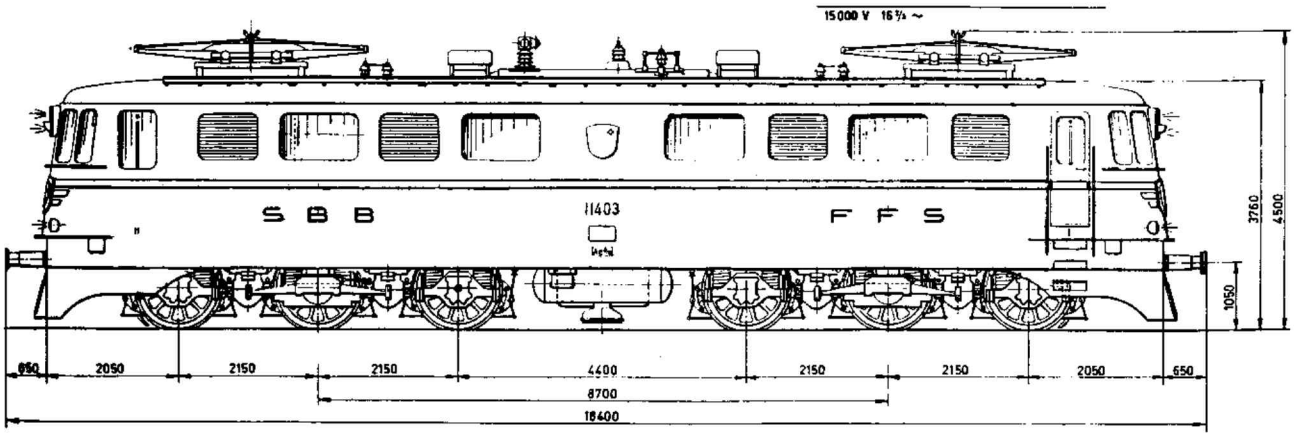
Théorie :

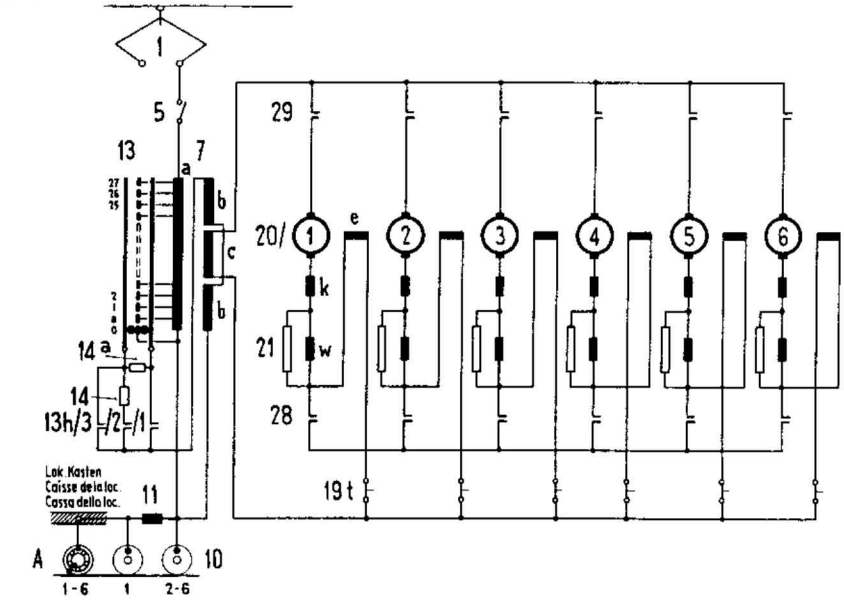
Entraînement électrique: A1; § 4.2.2 et 4.2.4

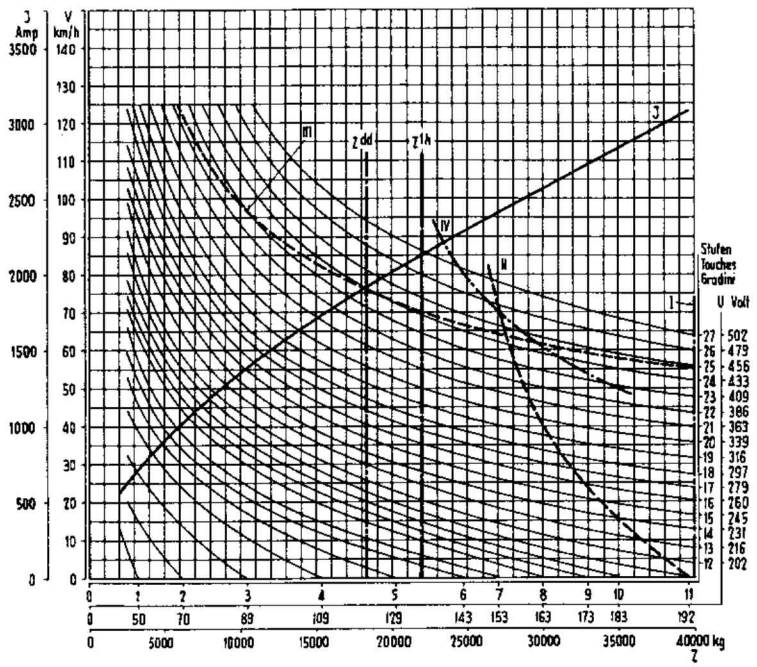
Entraînement mécanique: B3; § 5.4.7

Bibiliographie :

Réglement CFF



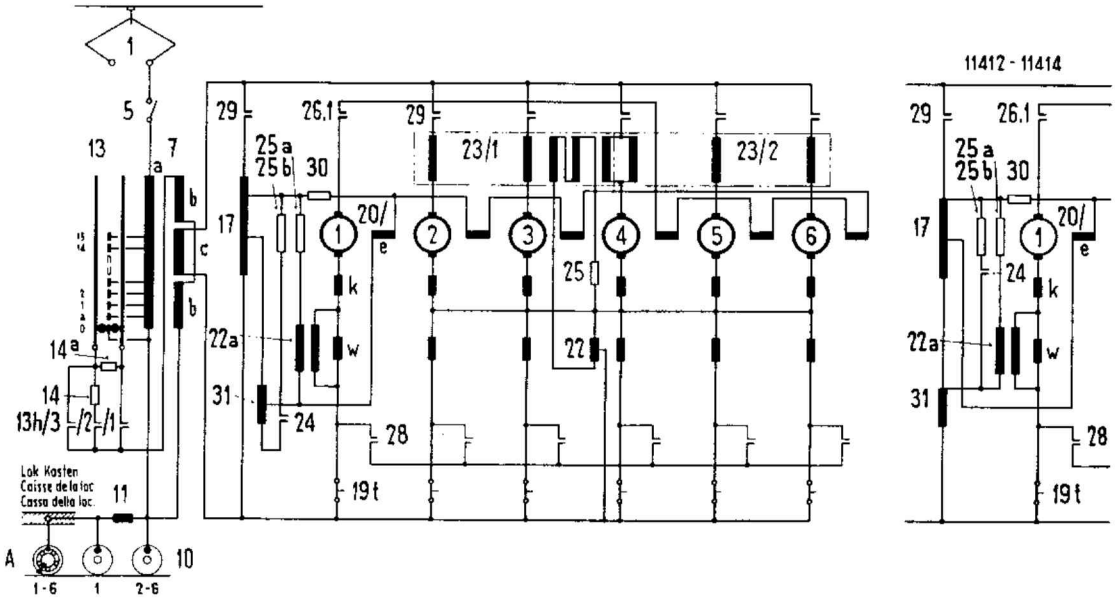


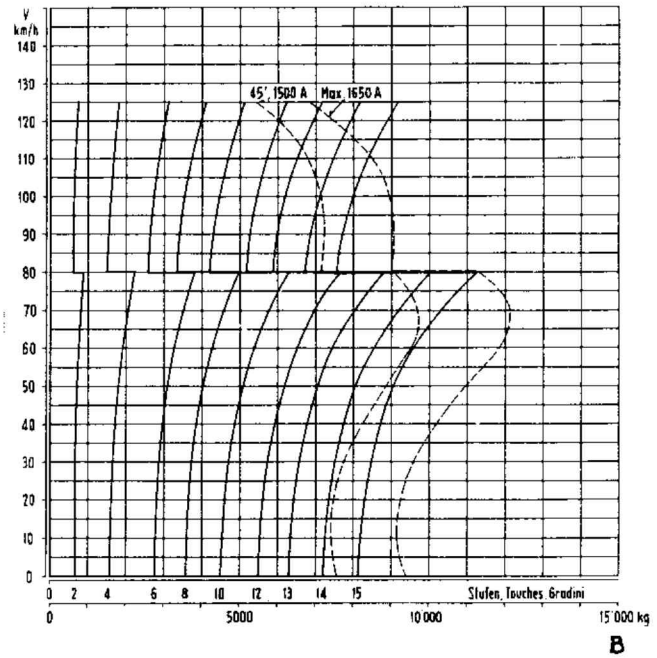


Z_{dd}	Effort de traction en régime continu
Z_{1h}	Effort de traction en régime unihoraire
I	Limite due au courant moteur maximal
II	Limite d'adhérence pour un coefficient de 0,3
III	Caractéristique à tension nominale aux bornes des moteurs
IV	Limite due au courant maximal au primaire du transformateur

Traction

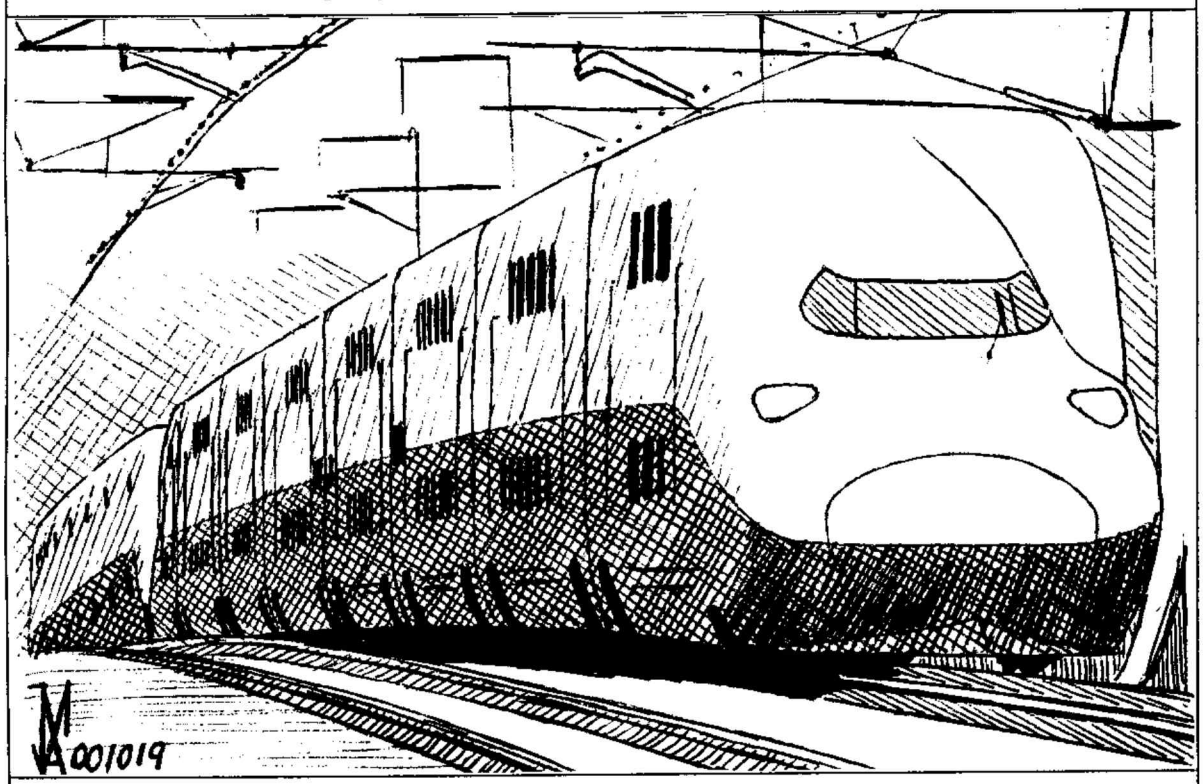
1 Pantographe
7 Transformateur
13 Graduateur
20 Moteur de traction
21 Shunt de l'enroulement de commutation
24 Commutateur "V > 80 km/h"
25 Résistance du circuit d'excitation
31 Self du circuit d'excitation



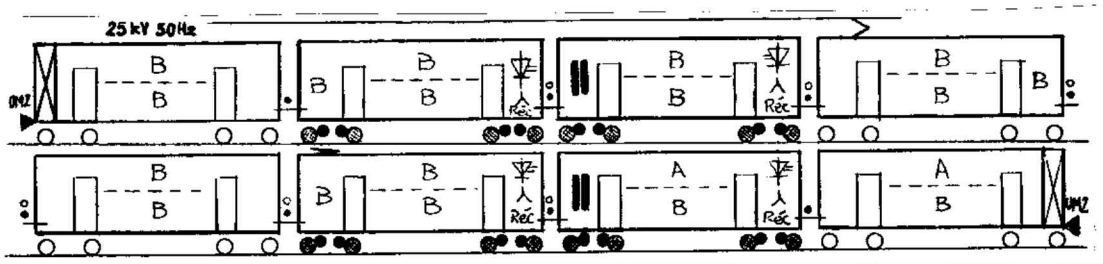


Freinage

2x(2'2'+2x(B_oB_o)+2'2') JREast E4 Max



Rame automotrice à grande vitesse, mise en service : 1997 – 1999
Nombre : 10
Immatriculation : P1 à P10
Constructeurs
– mécanicien : KHI
– électriciens : H
Ecartement : 1435 mm
Vitesse maximale : 240 km/h
Masse : 428 t
Places 1re classe : 54; 2e classe : 763
Effort en régime continu :
Z = 216 kN à 110 km/h
Effort maximal :
Z = 235 kN
B = 192 kN
Puissance continue : 6720 kW
Diamètre des roues : D_m = 870 mm
Réduction : k_G = 1 : 3,615
Transmission : cardan à roue dentée
Frein mécanique : pna



Raison du choix

Rame à grande vitesse intégralement à deux étages.

Remarques

Les *E4* reprennent l'essentiel des bogies et des caisses des *E1*. Les différences essentielles sont les suivantes:

– 8 voitures en alliage d'aluminium (428 t.) au lieu de 12 en acier (692,5 t).
– Voitures d'extrémité à nouveau profil en «bec de canard» pour réduire le bruit.
– Moteurs de traction passant de 410 à 420 kW.
– Convertisseurs à IGBT au lieu de GTO.

L'équipement est réparti en deux unités électriques identiques. En cas d'avarie d'une unité motrice, l'effort maximal de l'autre est porté de 118 à 250 kN pour sortir le train d'un tunnel en rampe de 25 ‰. Le courant admis est porté de 229 à 268 A.

Pour la même longueur qu'une rame *200H*, deux rames *E4* en UM offrent 1634 places au lieu de 1230 (30 % de plus).

Une *E4* est couplable avec une rame *400* ou une *E2*.

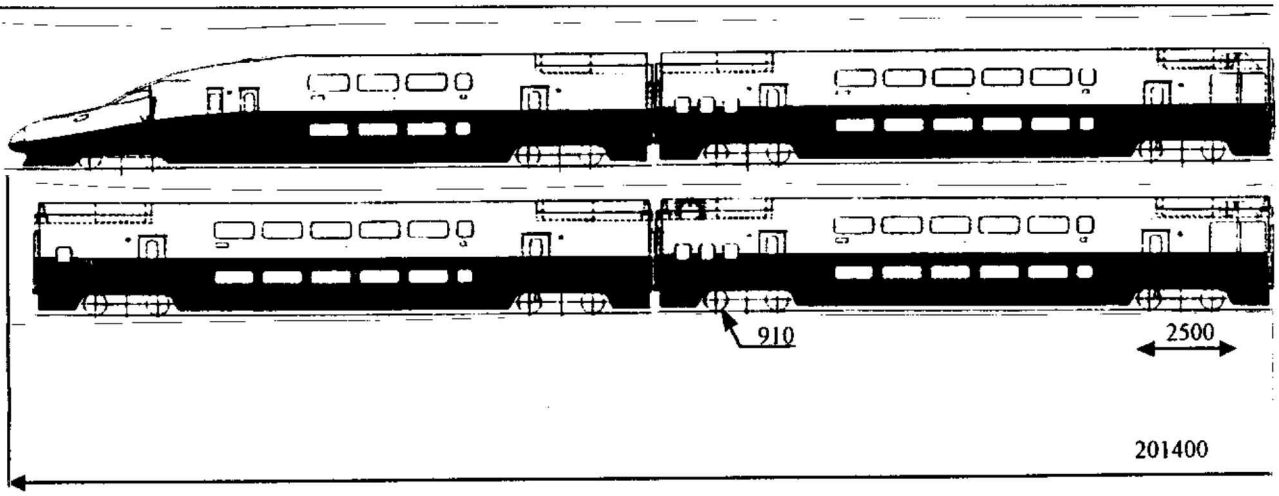
Les rames *700* de JRCentral (285 km/h, 8 (ou 16) voitures pour 571 (ou 1210) passagers sur un seul niveau) ont un équipement électrique à IGBT de même génération (mais à 60 Hz) et bénéficient aussi d'une aérodynamique «bec de canard».

Théorie

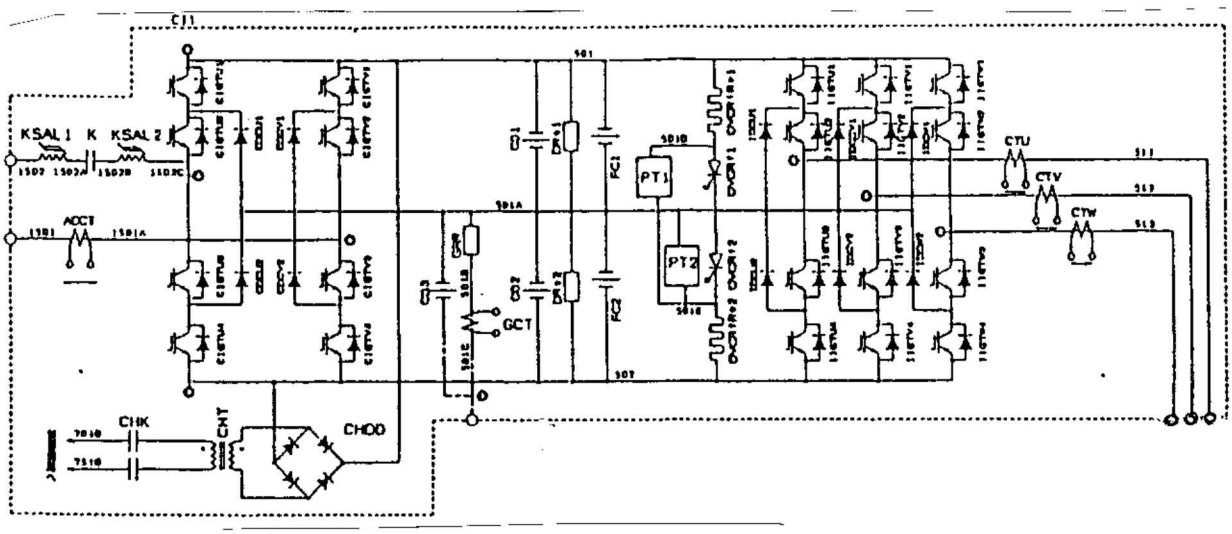
Entraînement électrique : A6; § 4.5.4
Entraînement mécanique : B3; § 5.4.1

Bibliographie

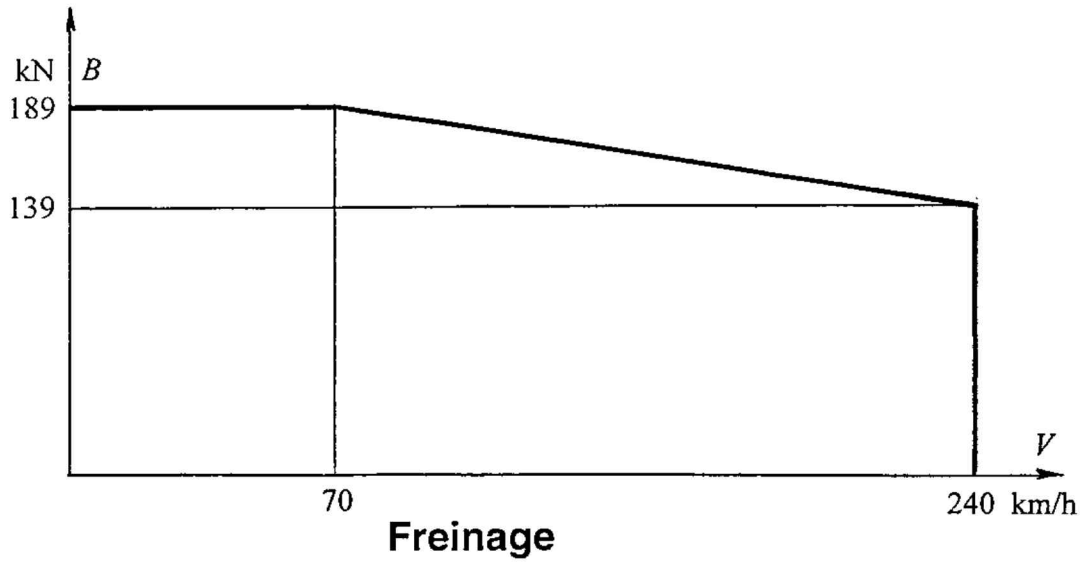
Y. SATO, . Development of the E4 Series double-decker high speed EMU, *Rail International*, n° janvier 1999, pp. 30 – 39.
JREAST, *Max E4*.



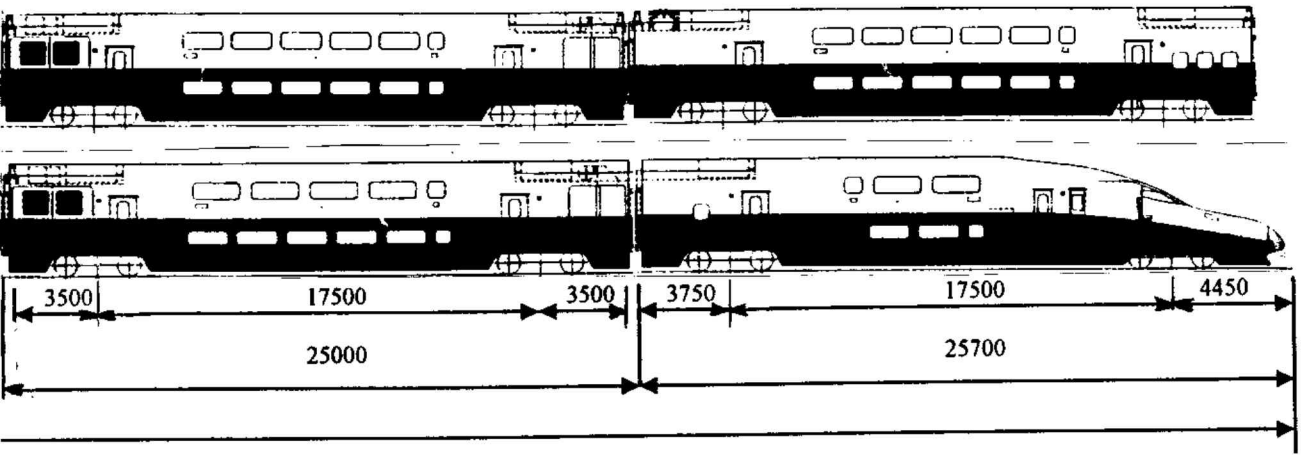
Echelle 1:300



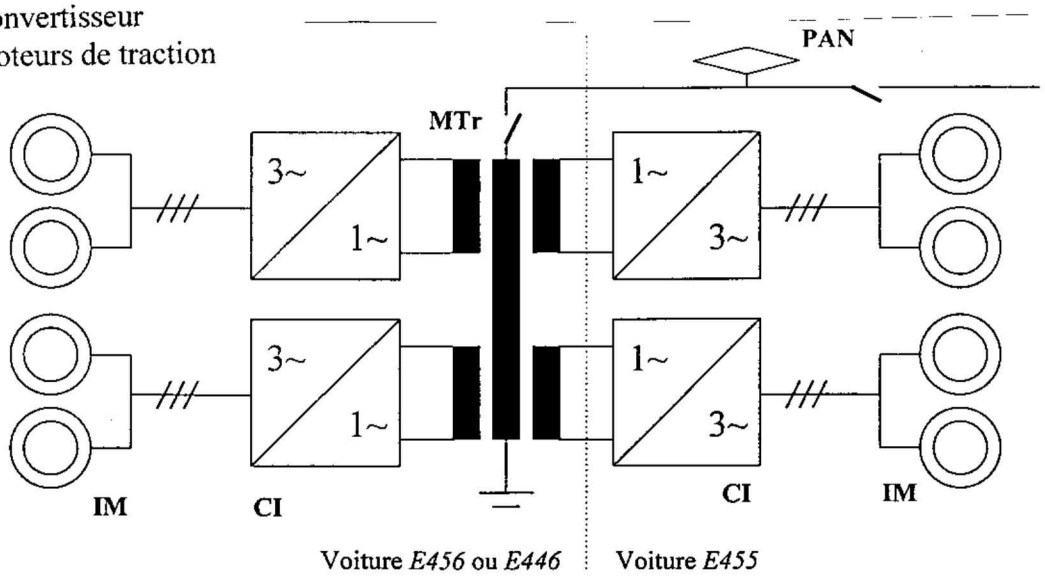
Détail d'un convertisseur



Freinage

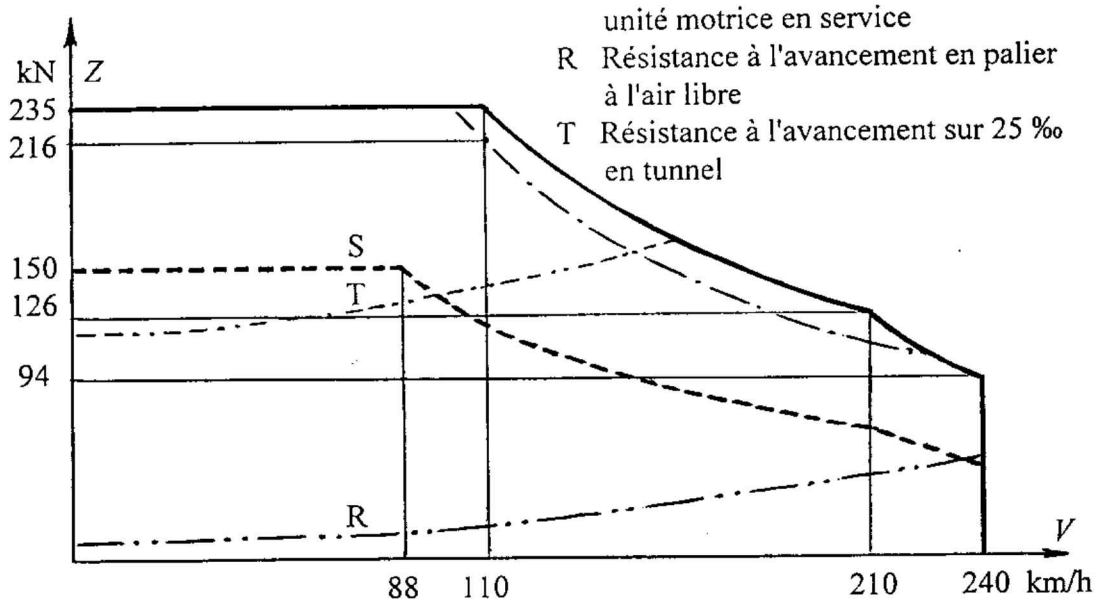


PAN Pantographe
MTr Transformateur principal
C I Convertisseur
IM Moteurs de traction



Circuit de puissance d'une unité motrice

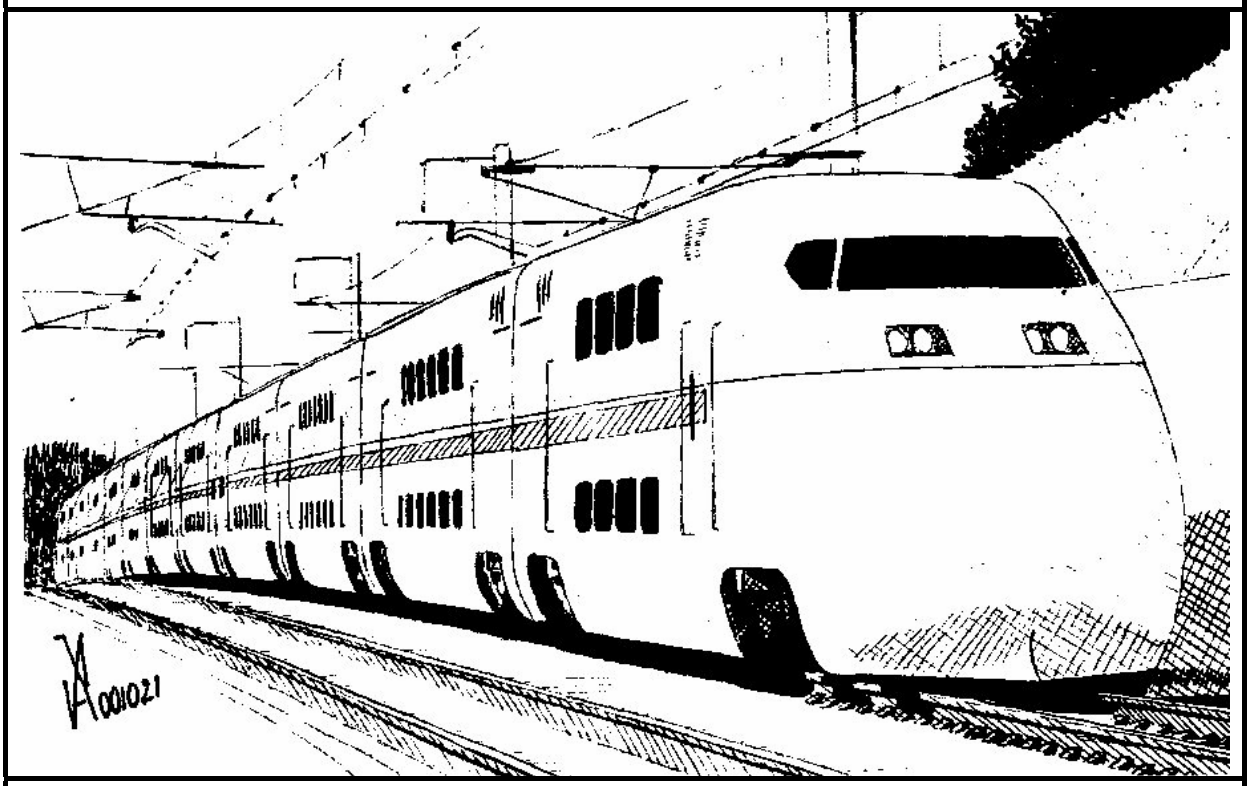
S Effort maximal avec une seule unité motrice en service
R Résistance à l'avancement en palier à l'air libre
T Résistance à l'avancement sur 25 ‰ en tunnel



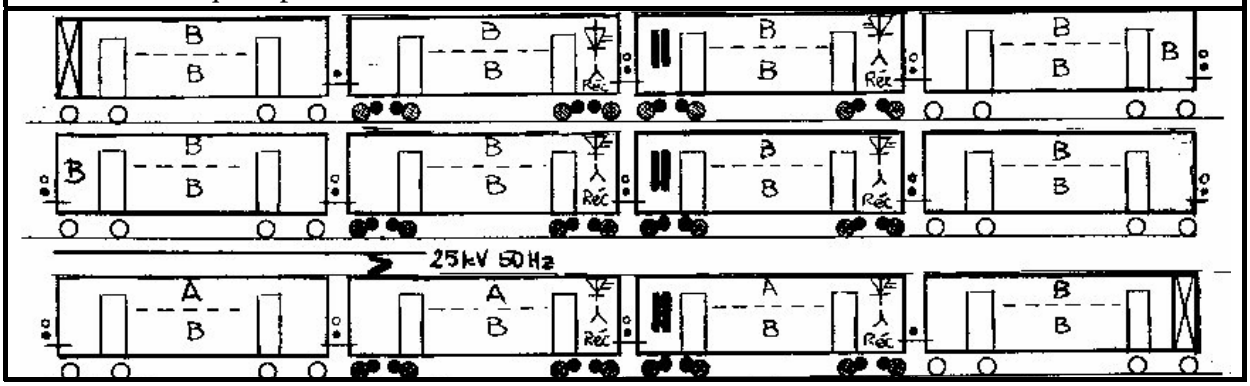
Traction

$B_oB_o+B_oB_o$ CPRR SS4

8.2.97



Locomotive pour trains marchandises Mise en service : 1986 - 1993
Nombre : 158
Immatriculation : SS40001A et B à SS40158A et B
Constructeurs :
– mécanicien : Zhuzhou
– électricien : Zhuzhou
Ecartement : 1435 mm
Vitesse maximale : 100 km/h
Masse : 186 t
Effort en régime continu : Z = 437 kN à 51,5 km/h
B = 412 kN à 46 km/h
Effort maximal : Z = 628 kN B = 463 kN
Puissance continue aux arbres des moteurs: 6400 kW
Diamètre des roues : D_m = 1200 mm Réduction : 1 : 4.19
Transmission : moteurs suspendus par le nez
Frein mécanique : pna



Raison du choix :

Très grande série d'engins de traction mus par moteurs à collecteurs. Avec ponts à 4 niveaux en montage économique

Remarques :

Le concept de la partie électrique provient des développements propres de Zhuzhou sur une CoCo de type SS3 modifiée avec commande entièrement à thyristors, ainsi que de transferts technologiques du groupe 50Hz.

On recense encore plus de 1100 SS4G, encore en cours de livraison en 2005, qui bénéficient d'améliorations de l'adhérence par la mécanique des bogies et par un dispositif antipatinage plus performant. Elles sont réparties en 4 sous-séries produites par différents constructeurs chinois. Les 72 SS4B se distinguent par d'autres moteurs et des améliorations dans la structure des caisses. Les 2 SS4C sont des SS4G avec ballasts additionnels qui les portent à 200 t.

Pour faire face à la rapide progression des besoins en traction, 150 machines 8K de mêmes performances ont été livrées en même temps par le groupement européen 50 Hz.

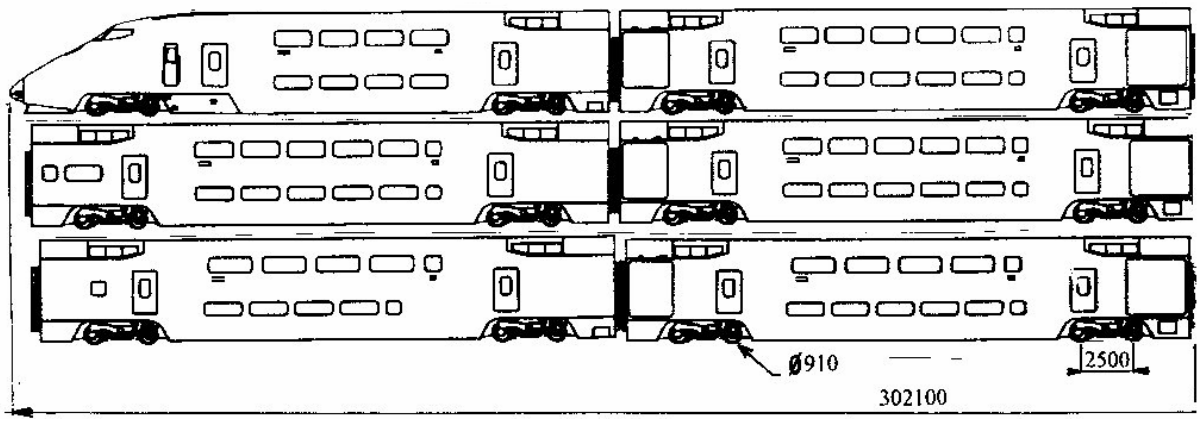
Deux prototypes SS5 ont été construits en 1990: ils correspondent à des moitiés de SS4 équipées de deux cabines de conduite. Ils se distinguent toutefois par des moteurs entièrement suspendus et des bogies à suspension pneumatique et peuvent rouler à 140 km/h. En sont issus dès 1994 environ 250 SS8, de puissance portée à 3600 kW pour une vitesse maximale de 170 km/h. Les 12 TM1 livrées aux chemins de fer de banlieue de Teheran sont essentiellement des SS5 monocabines destinée à encadrer des rames à deux niveaux.

Théorie :

Entraînement électrique : A6 ; § 4.4.3.
Entraînement mécanique : N3 ; § 5.3.2

Bibliographie :

Documents ZHUZHOU.



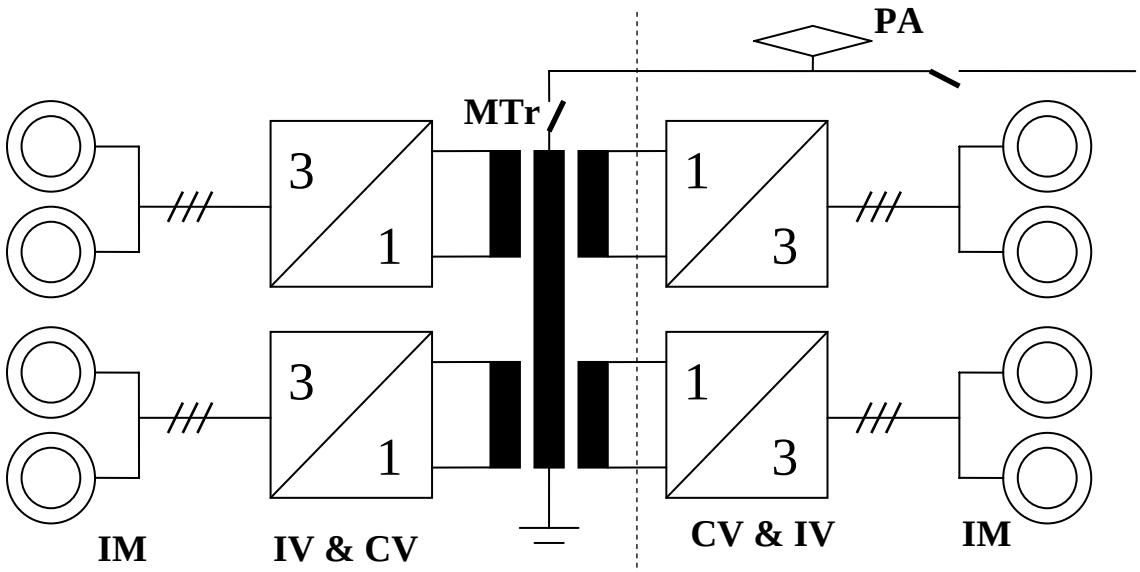
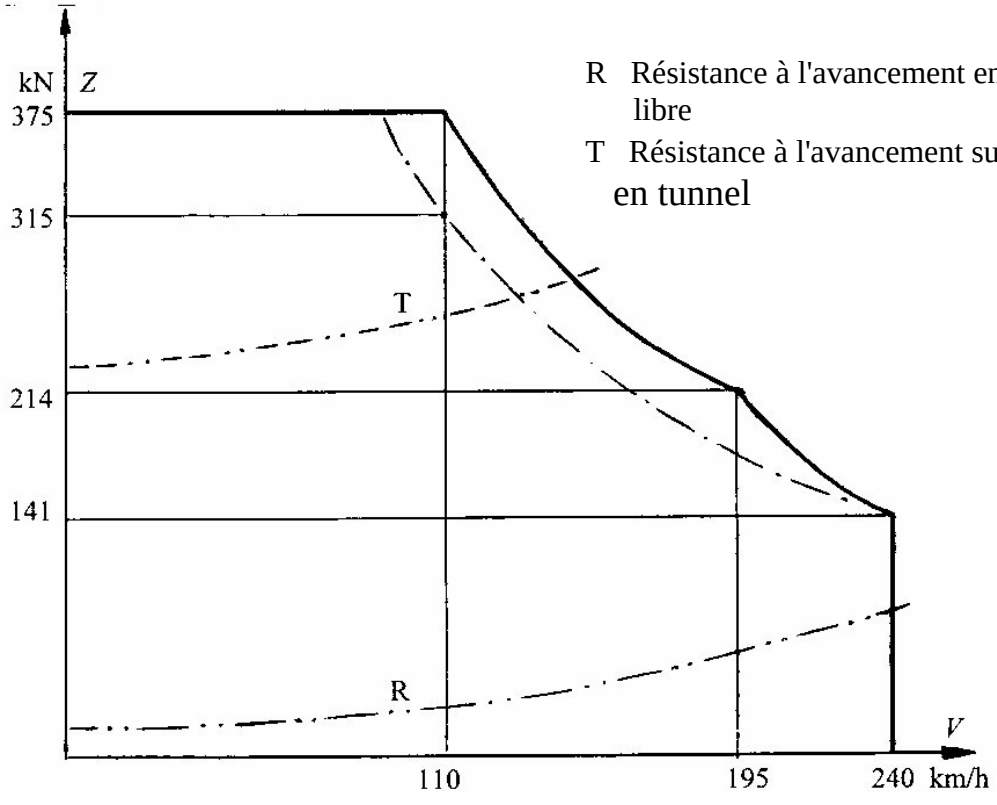


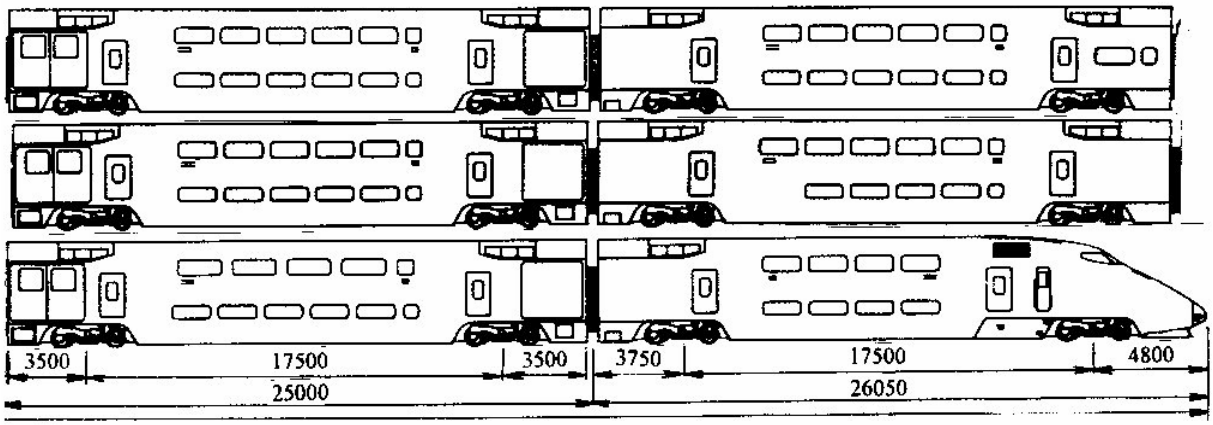
Schéma de puissance d'une unité motrice

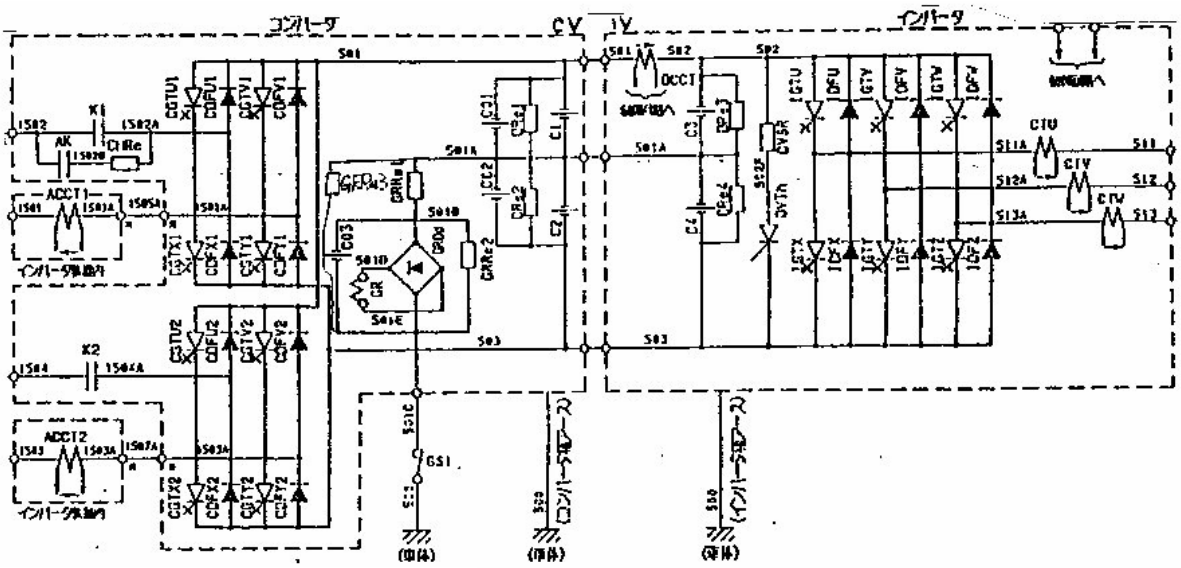


R Résistance à l'avancement en palier à l'air libre

T Résistance à l'avancement sur 25 ‰ en tunnel

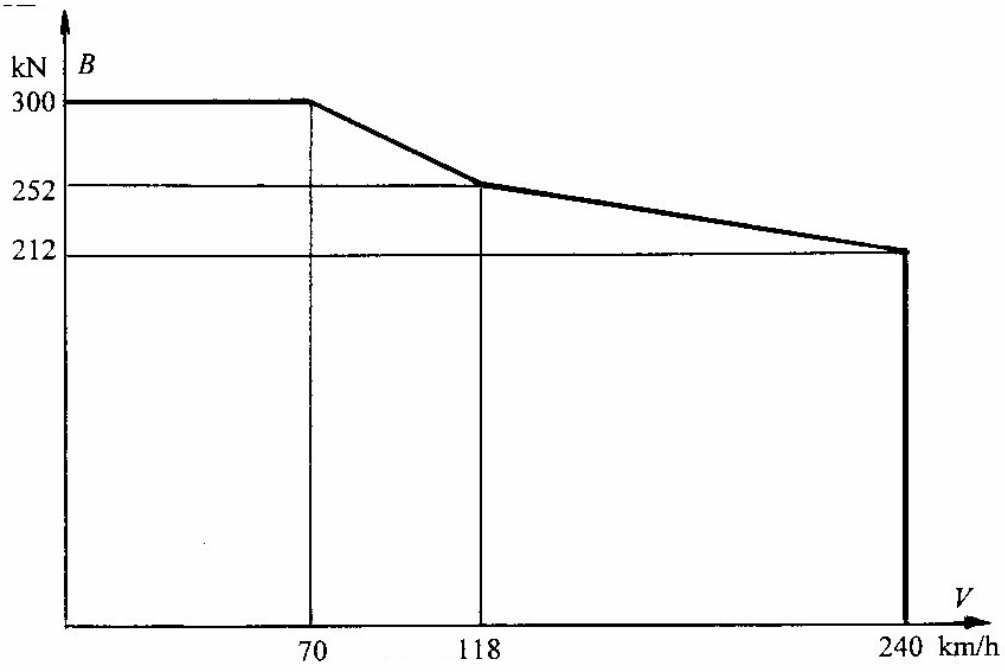
Traction





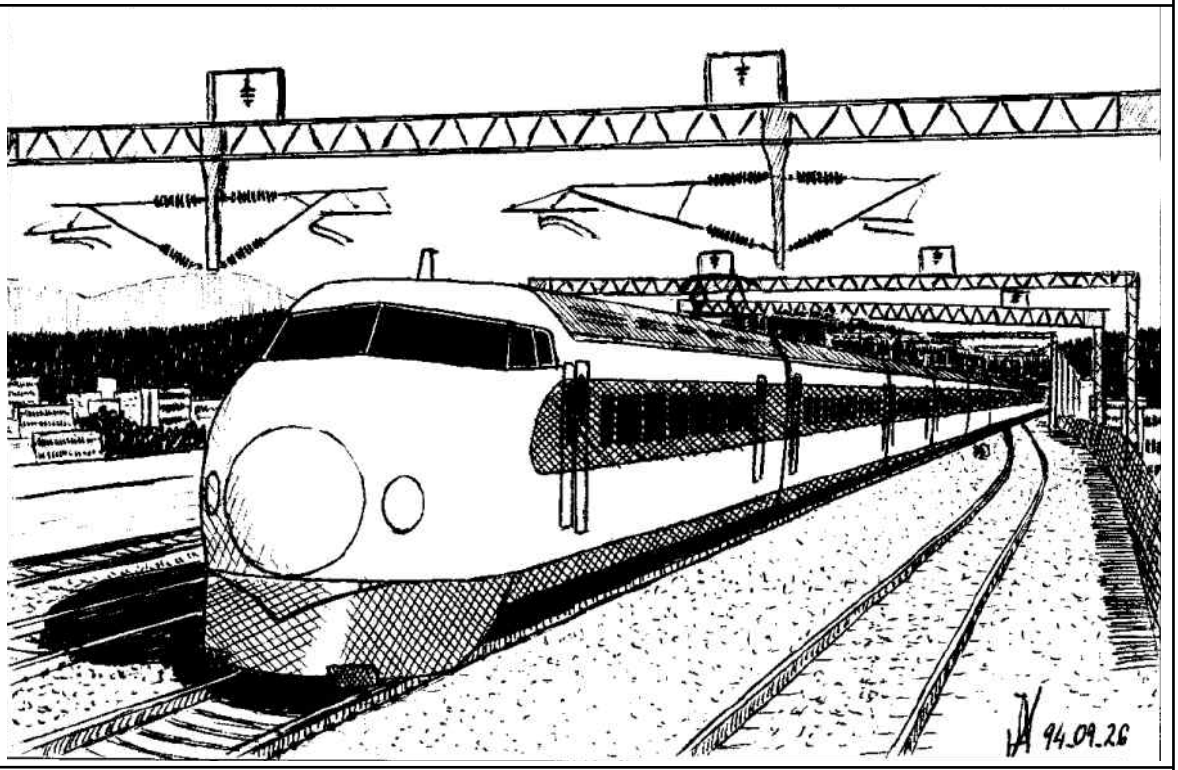
PAN Pantographe
MTr Transformateur principal
CV Convertisseur côté réseau
IV Convertisseur côté moteurs
IM Moteurs de traction

Détail d'un convertisseur

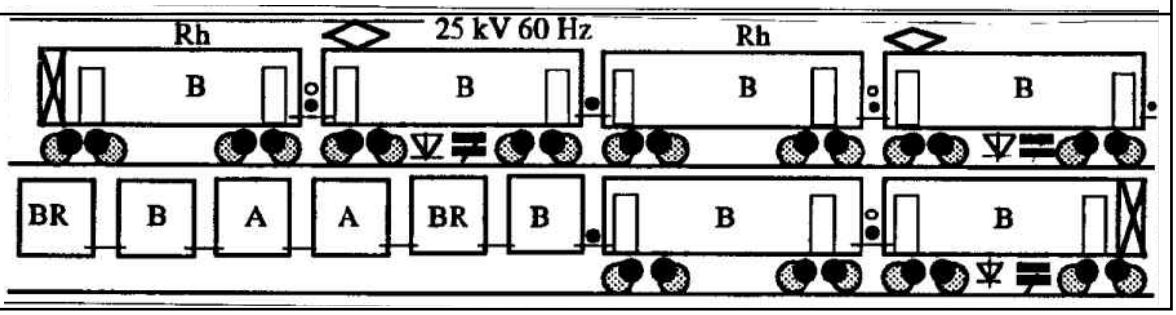


Freinage

6 x (B_oB_o + B_oB_o) JNR Shinkansen 0



Rame automotrice à grande vitesse mise en service : 1973 – 1979.
Nombre : 117
Constructeurs
– mécanicien : H, MHI, KHI
– électricien : MHI, TS, NS, H
Vitesse maximale : 210 km/h
Masse: 720 t
Places : 1ère : 132 ; 2e : 855
Effort en régime continu :
Z = 188 kN à 167 km/h
Effort maximal :
Z = 360 kN *B* = 180 kN
Puissance continue : 8880 kW
Puissance maximale : kW
Diamètre des roues : 870 mm
Réduction: 1 : 2,17
Transmission : élastique *Sumitomo*.
Frein mécanique : epna



Raison du choix:

Premier train à grande vitesse; il circule sur son réseau propre, d'écartement et gabarits différents du réseau préexistant.

Remarques :

Les rames 0 sont à adhérence totale, chaque essieu est mû par un moteur de 185 kW.

Deux véhicules forment une unité indissociable (*manied pair*), l'une portant pantographe, transformateur et redresseur, l'autre les résistances de freinage et d'affaiblissement du champ.

Dès 1970, les rames sont portées de 6 à 8 manied pairs.

Les 30 premières rames de 1964 ont été ferraillées de 1976 à 79, au rythme de nouvelles livraisons.

Les rames 200 (1980 –) destinées à la ligne Nord sont à 50 Hz. Elles ont 12 voitures et 48 moteurs de 230 kW. En traction, la commande se fait par ponts à thyristors et en freinage rhéostatique à excitation série, par contacteurs.

Les rames 100 (1985 –) profitent des progrès de l'électronique de puissance en traction. Le frein rhéostatique à excitation séparée fixe est réglé par résistance variable à contacteurs. Les moteurs sont de 230 kW. Les rames sont formées de 12 voitures (dont 10 motrices) ou 16 voitures (dont 12 motrices). Certaines voitures non motorisées sont à deux niveaux. Vitesse maximale: 240 km/h.

Les rames 300 (1990 –) ont des moteurs asynchrones de 300 kW alimentés à fréquence variable par onduleur à GTO. Rames de 16 voitures don 10 motrices. Vitesse maximale: 270 km/h.

Les rames 400 (1990 –) ont un équipement électrique étroitement dérivé de celui des rames 200. Elles n'ont que 6 véhicules et leur gabarit plus étroit leur permet d'emprunter en parcours terminal d'anciennes lignes classiques dont seul l'écartement a été adapté.

Théorie :

Entraînement électrique: A2 ; § 4.4.1
Entraînement mécanique: B2 ; § 5.4.6

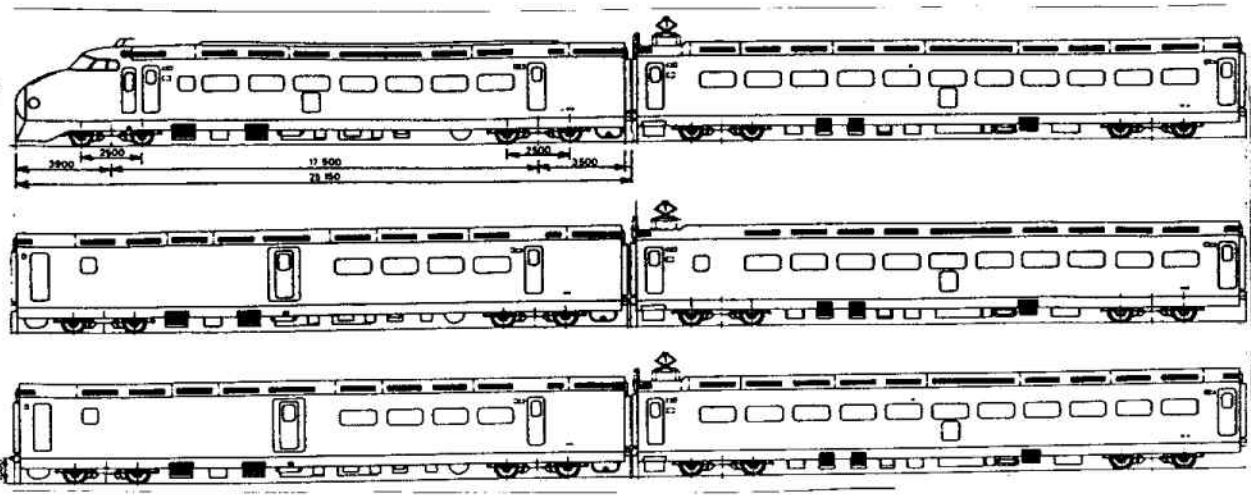
Bibiliographie :

Electric trains for the New Tokaïdo Line, 1965, The Railway Gazette, 5 fév. 1965, p. 100 – 104.

A.CAIRE: *Le Shinkansen*, 1985, Chemins de Fer, n° 372, p 125 – 141 et n° 373, p. 145 – 165.

M. KIMATA, S. ISHIKAWA, S. INADAMA, Y. HAGIWARA: *AC drive for Shinkansen rolling stock*, 1991, Elektrische Bahnen, n° 89, p. 44 – 45.

Echelle
1:300



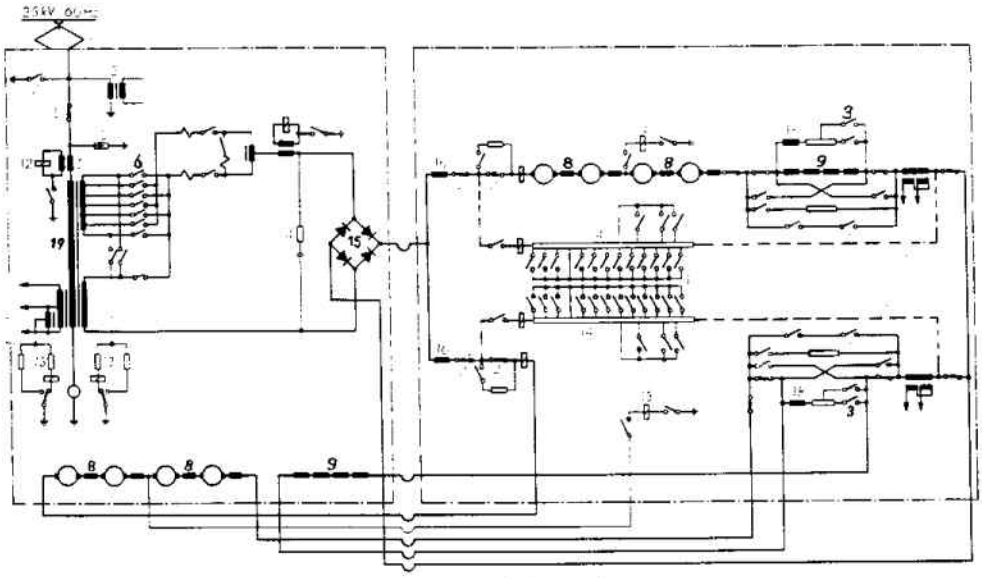
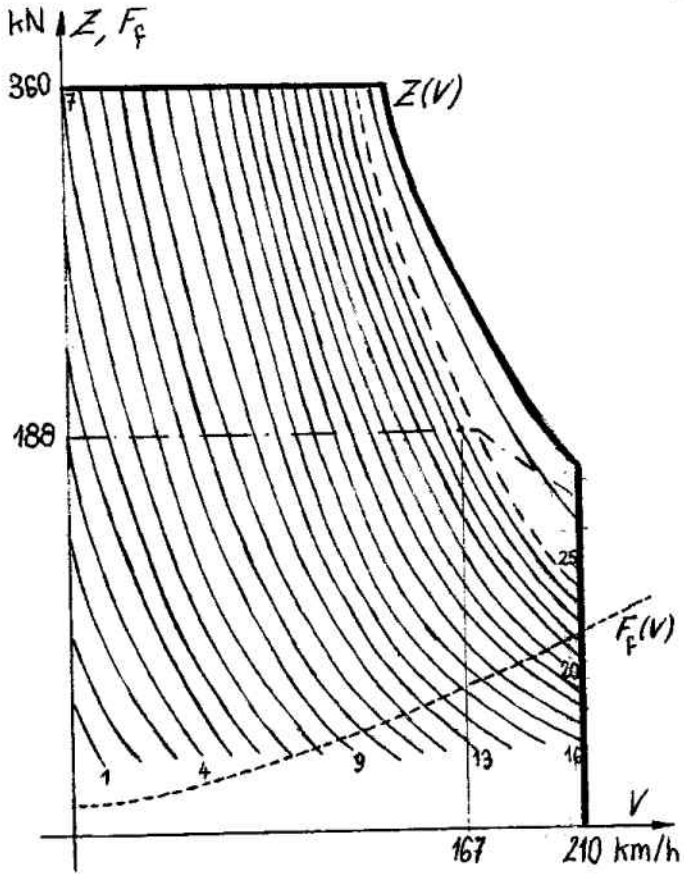
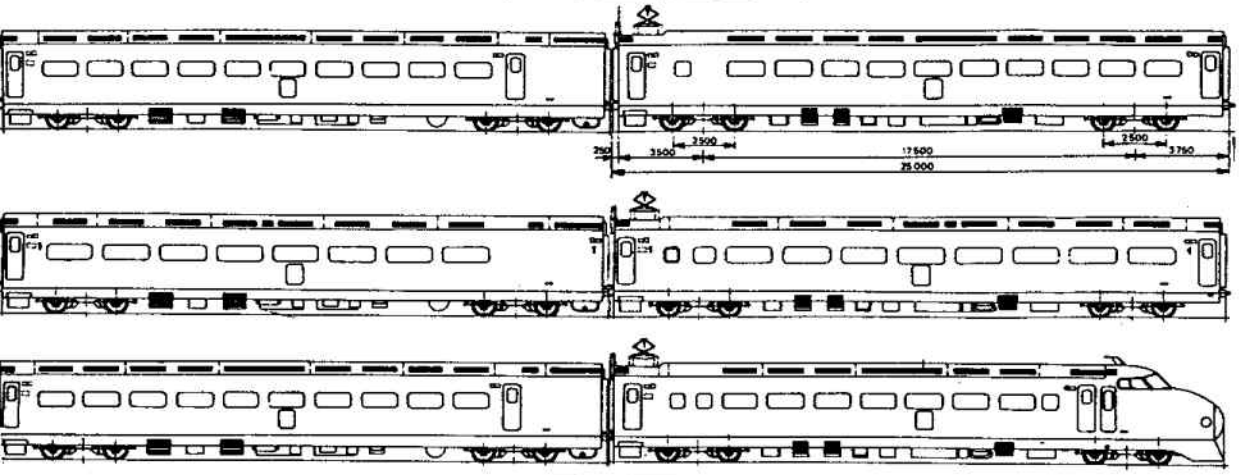


Schéma
(*manied pair* B$_o$
19 transformateur
6 contacteurs de
15 redresseur de tr
8 moteur de tracti
9 moteur de tracti
3 shunt
14 résistance de fre

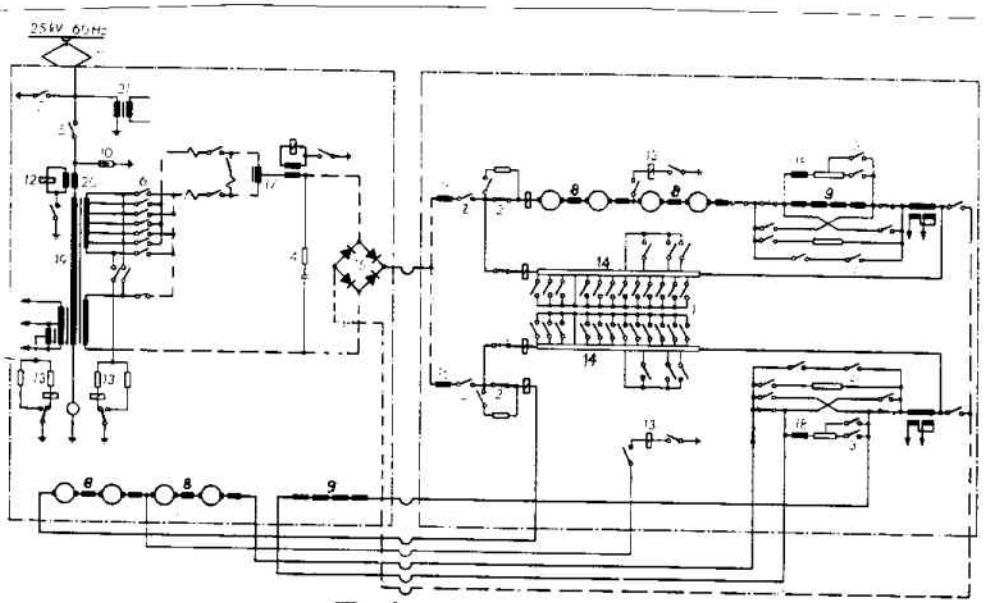
Traction



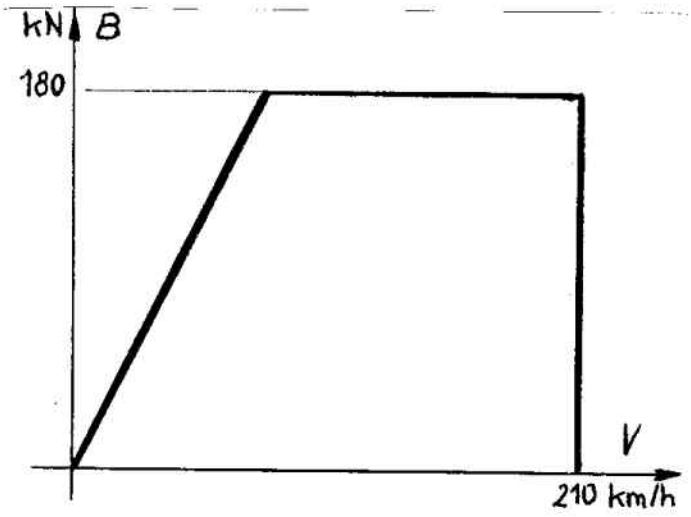


$B_o + B_oB_o$)
principal
raduation
action
on. induit
on: excitation

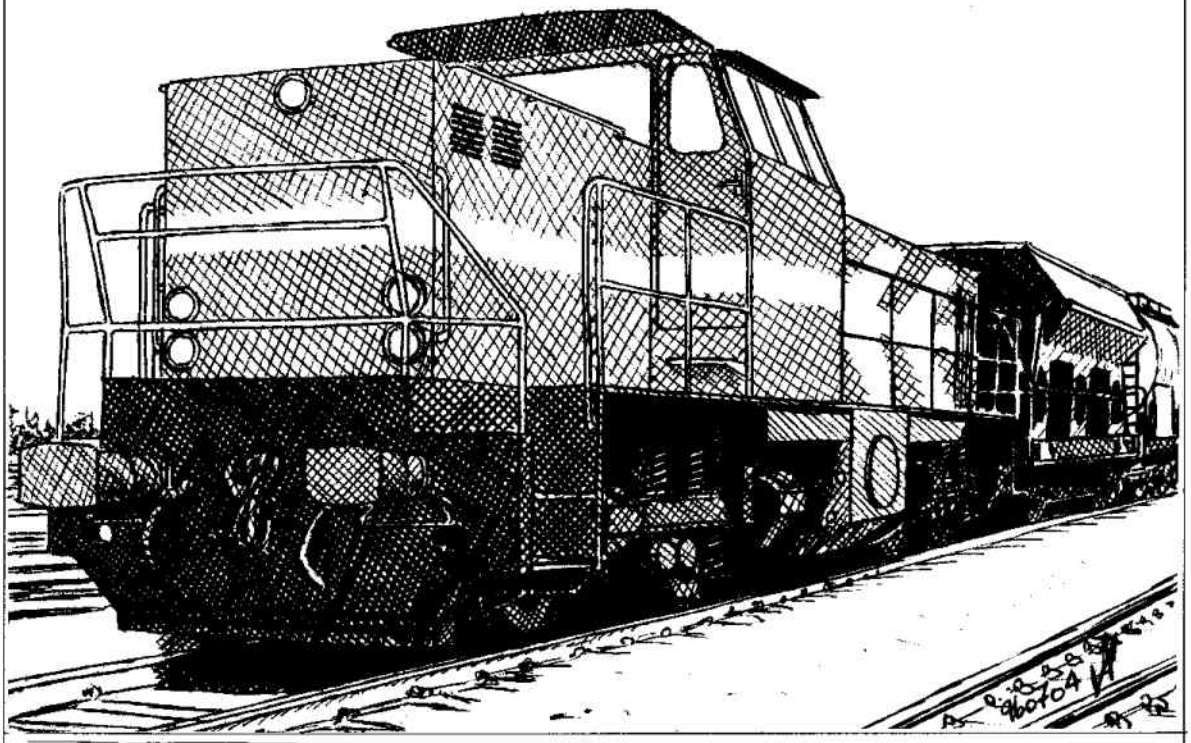
inage



Freinage

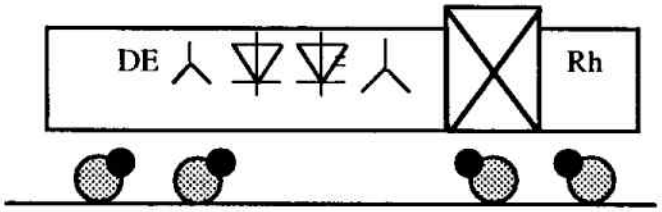


B_oB_o KBE DE 1002



Locomotive pour services marchandises et manoeuvre
Mise en service:dès 1987
Nombre: 10 Immatriculation: DE81 à 85, DE91 à 95
Constructeurs: mécanicien: MaK diesel: MWM
électricien: ABB
Ecartement: 1435 mm Vitesse maximale: 70 km/h
Masse: 88 t
Effort en régime continu: Z = 135 kN à 30 km/h

Effort maximal: Z = 340 kN
B = 120 kN
Puissance continue à la jante: 1125 kW / au diesel: 1320 kW
à l'arbre des moteurs de traction: 1140 kW
Diamètre des roues: D_m = 965 mm Réduction: k_G = 1:6,214
Transmission: à roue dentée élastique, moteurs suspendus par le nez
Frein mécanique: pna



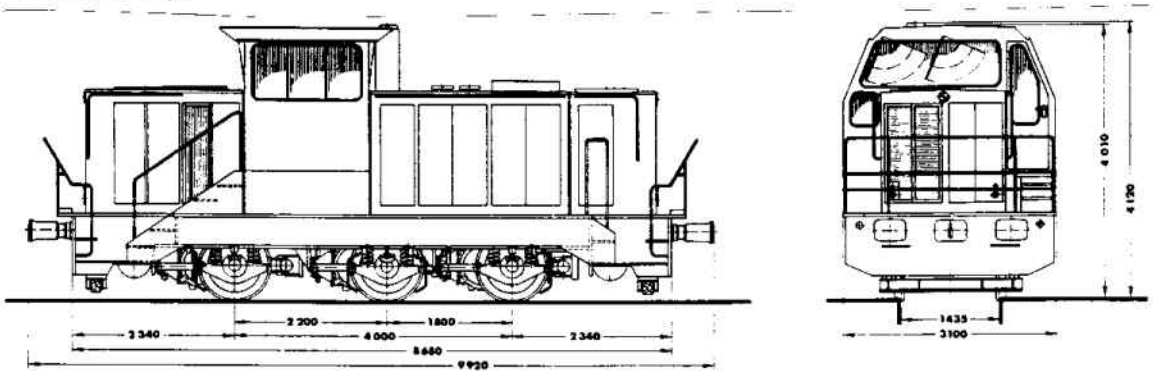
Raison du choix:

Exemple représentatif de locomotive diesel électrique de petite à moyenne puissance à moteurs asynchrones à fréquence variable.

Remarques:

La transmission à moteurs asynchrones a été développée sur les 3 prototypes 202 de la DB (DE 2500 de Henschel - BBC, 1971 - 73, 1840 kW).

En 1991, KBE a encore commandé 8 machines identiques à livrer dès début 1993. Ces machines ont un entraînement modulaire standardisé appliqué à d'autres véhicules: •Type B_oB_o, à cabine centrale:24 DE 1002 à diesel de 1120 kW (diverses industries dès 1982, 1000 kW); 120 6400 (NS, 1000 kW) et 5 DE 64ET (Eurotunnel, 1000 kW); 40 ME 07 (TCDD, 785 kW) et 15 ME10 (MSC, Iran, 1000 kW), 62 D145 (FS, 850 kW). •Type C_o, à cabine centrale:65 DE 500/501/502 (diverses industries (13 machines à RAG), 500 à 560 kW).



Le même principe de chaîne de traction se trouve dans les autorails double BM 92 (NSB, $2B_o+B_o2$, 720 kW) et les locomotives bimode 181 à 186 (EH, diesel/600V=, 475/1000 kW). La partie mécanique et le moteur diesel sont semblables sur les 70 diesel-hydraulique G 1200 de MaK circulant notammant pour RAG, EH, SERSA (Suisse) et OCTRA (Gabon).

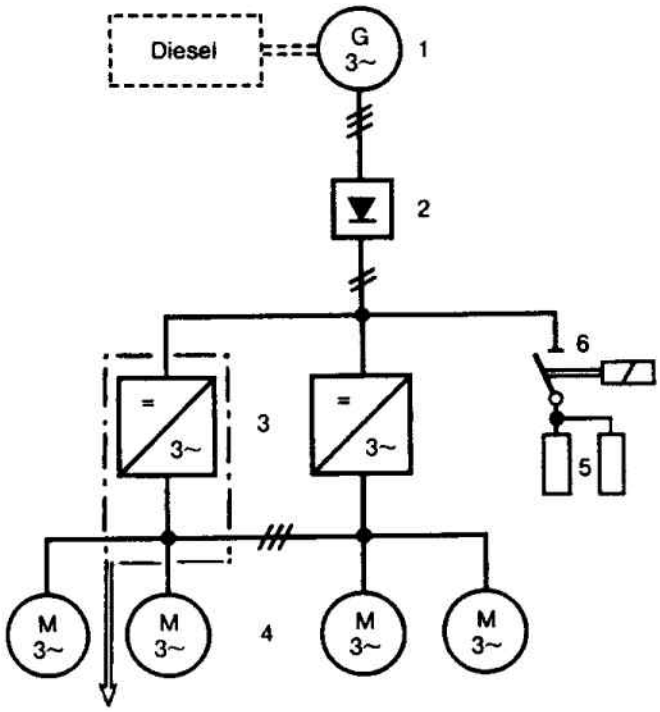
Les thyristors GTO ont permis de nouveaux développements à l'aide des prototypes 240 de la DB (DE 1024, 2650 kW): DE 1003 (RAG) et Dr16 (VR) à concept mécanique voisin des DE 1002; automotrices doubles 3000/3100 (STA, $B_o'B_o'$+2'2'); locomotives bimode FL9AC (MNCRC, Bo'(A1A)', 1865 kW, diesel / 650 V= par 3e rail via convertisseur 4 quadrants élévateur de tension); automotrices à caisses inclinable 610 (DB, 2'(A1)'+(1A)'(A1)')

Théorie:

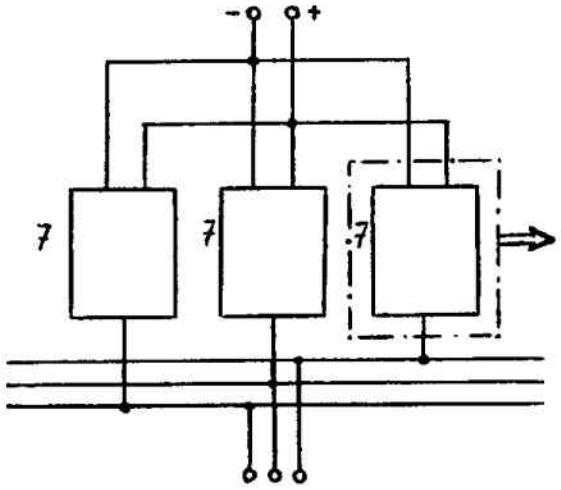
Entraînement électrique: D3; § 4.9.4, 4.5.4
Entraînement mécanique: N2; § 5.3.2

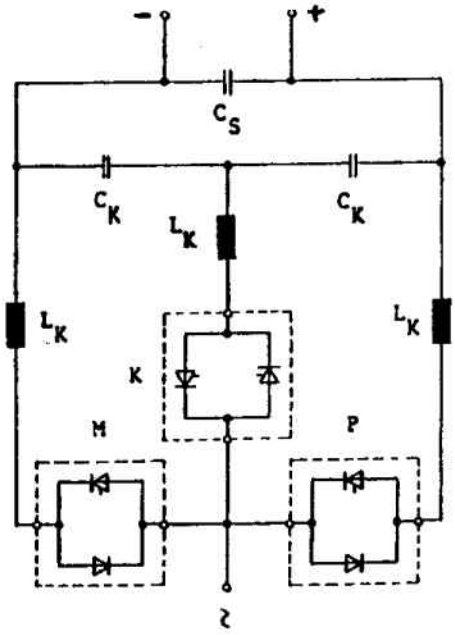
Bibliographie:

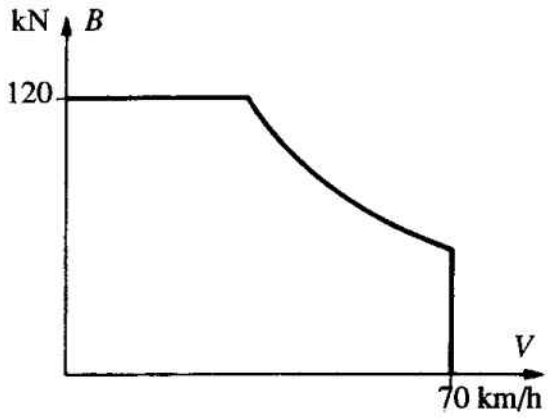
W. MATTHAI: *Industrielokomotiven mit standardisierter Drehstrom-Antriebstechnik*, ABB, D VK 1301 88 D.
BBC: *Dokumentation DE 1002/3*, 1698B
BBC: *1100 kW Standard Diesel Locomotive*, D VK 1268 82E
BBC: *Dieselelektrische Standardlokomotiven Krupp-MaK Loktyp DE 1002, 3. Bauserie*, D VK 1029 87D.



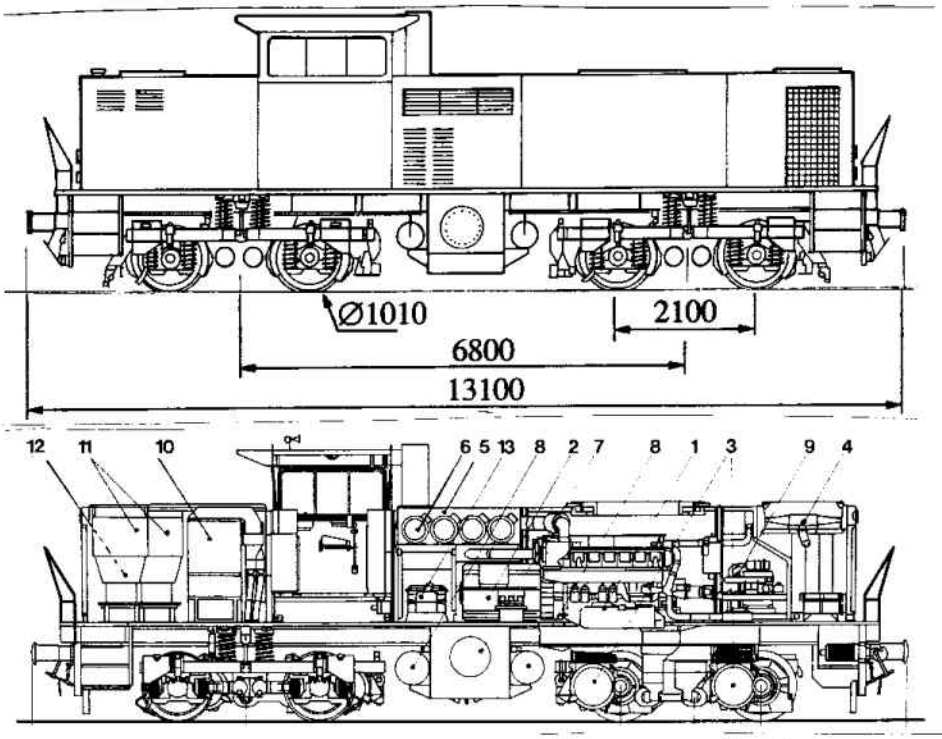
1 alternateur principal
2 redresseur
3 onduleur
4 moteurs de traction
5 résistances de freinage
6 commutateur de freinage
7 branche d'onduleur
P module positif
M module négatif
K module de commutation



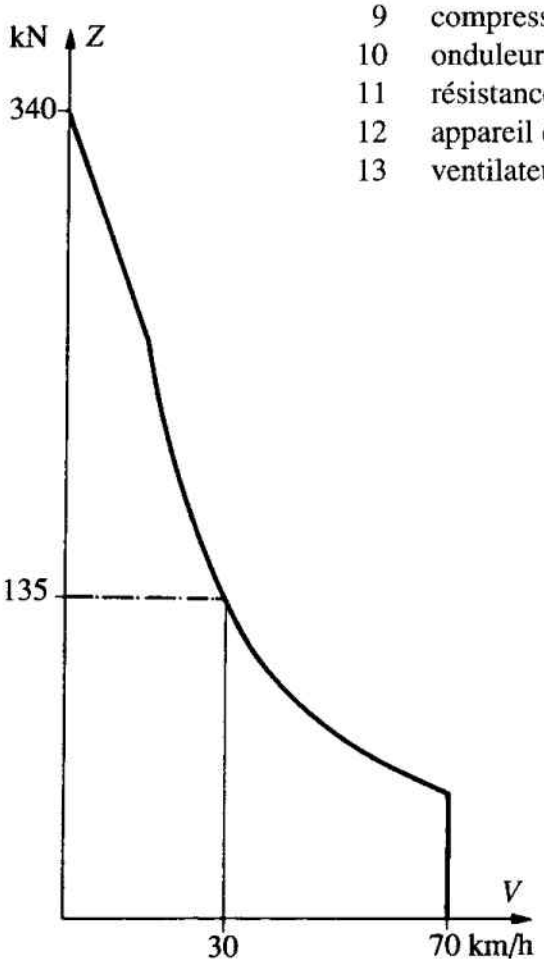




Freinage



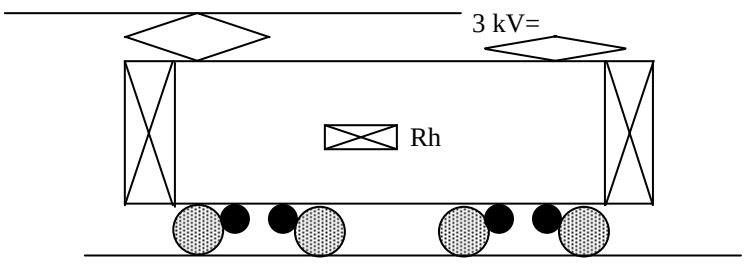
1 moteur diesel
2 alternateur
3 moteur et réducteur
4 silencieux d'échappement
6 filtres à air
7 réservoir de carburant
8 réservoir d'ai comprimé
9 compresseur
10 onduleur
11 résistance de freinage
12 appareil de frein pneumatique
13 ventilateur central



Traction

B_oB_o FS E444

Locomotive pour trains rapides mise en service : 1965 – 1975
Nombre : 117
Immatriculation : 444-001 à 444-117
Constructeurs
– mécanicien : Savigliano
– électricien : Savigliano
Vitesse maximale : 200 km/h
Ecartement : 1435 mm
Masse: 83 t
Effort en régime continu :
Z = 111 kN à 120 km/h
Effort maximal :
Z = 201 kN
Puissance continue : 3820 kW
Puissance unihoraire : 4272 kW
Diamètre des roues : 1210 mm
Réduction: 1 : 1,925
Transmission : élastique à arbre creux
Frein mécanique : pna



Raison du choix

Première locomotive de vitesse en Italie.

Remarques

Développée par la *Società Nazionale delle Officine* à Savigliano (prototypes 1 à 4), la construction des machines de série a été répartie entre différents constructeurs italiens.

En traction, chaque bogie à deux moteurs en série est commandé par un rhéostat grossier à 2 crans et un rhéostat fin à 7 crans. La transition série parallèle s'effectue par la méthode du pont.

En freinage, les induits en série de chaque bogie débitent sur un rhéostat commun, l'excitation est fournie par deux groupes moteur-alternateur-redresseur, avec batterie-tampon.

Les machines 056 et 057 ont servi de banc d'essai pour la technique du *shunt chopper*, dans laquelle un hacheur pulsait une partie du rhéostat afin de faire varier sans à-coup sa valeur ohmique moyenne. La machine 005 a servi pour la mise au point de la commande à hacheur (*full choppe*r) qui préluda la construction de la série E633 (fiche 8.8.3). Ces machines ont été remises au type au terme des essais.

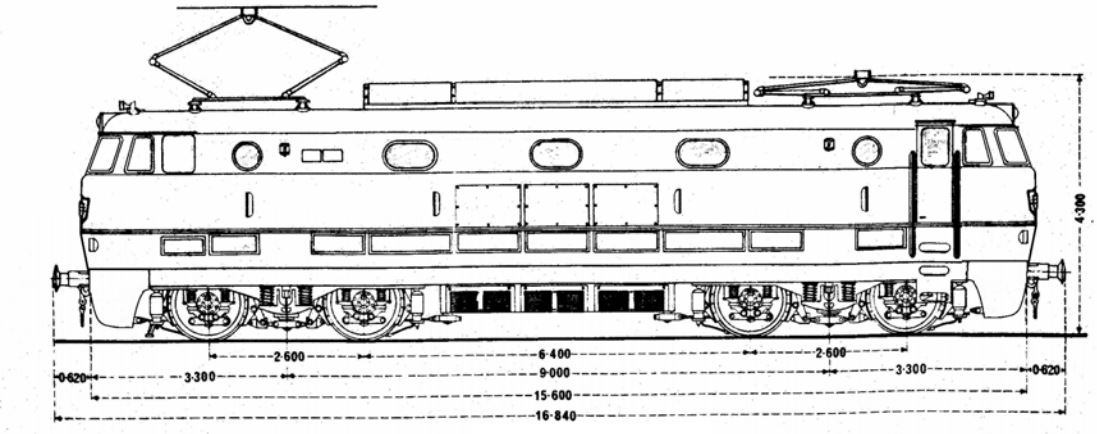
A l'exception des 4 prototypes, la série a été convertie en E444R par amélioration du freinage et de l'aérodynamique (1986–1989).

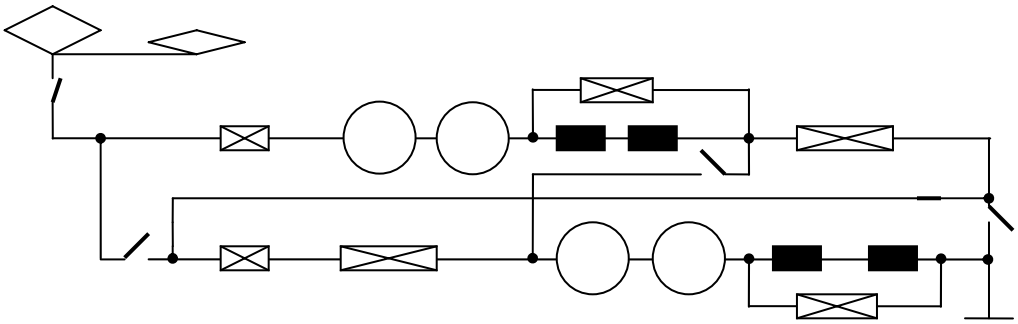
Théorie

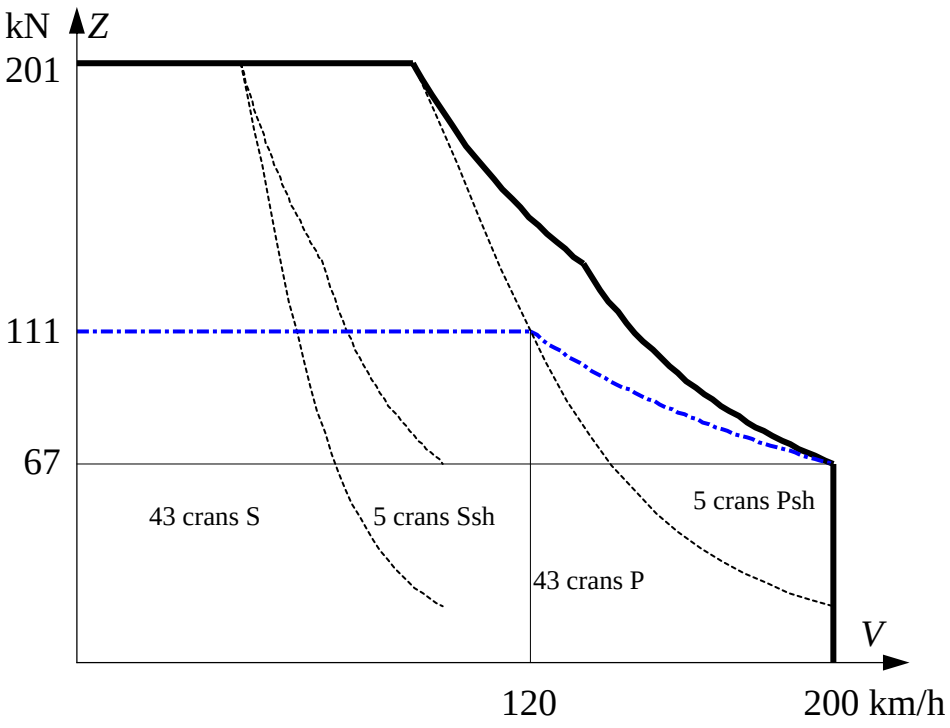
Entraînement électrique : C1; § 4.1.2 et 4.1.4.
Entraînement mécanique : B4; § 5.4.7.

Bibliographie

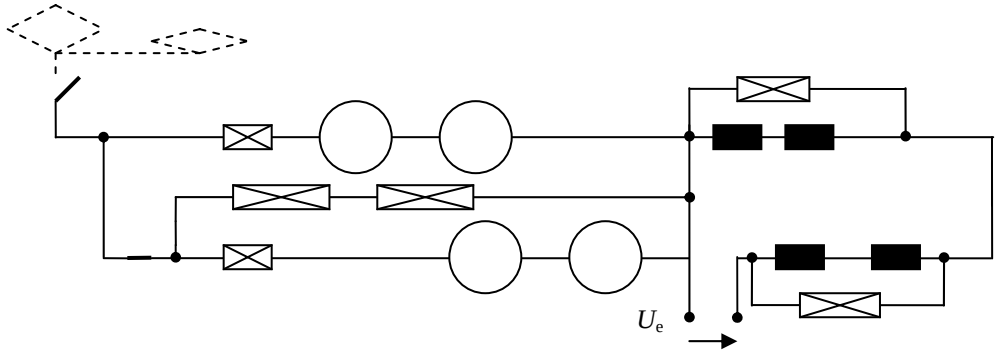
G. GIOVANARDI : *Tratto da Ingegneria Ferroviaria***,** http://www.miol.it/stagniweb/if/if0168.htm, janvier 1968.


4·300
620
2·600
3·300
6·400
9·000
15·600
16·840
2·600
3·300
620




kN
Z
201
111
67
43 crans S
5 crans Ssh
43 crans P
5 crans Psh
V
120
200 km/h

Traction



Freinage