

621. 335. 2
+ ————— 024/025.14

44
+

Les nouvelles locomotives européennes polycourant

L'électrification des chemins de fer est très loin de constituer un modèle de normalisation, et peut paraître à certains une telle tare dans le domaine de l'électrotechnique qu'il nous apparaît utile de situer tout d'abord ce problème à la fois sur les plans qualitatif et quantitatif.

LE PROBLÈME DES ENGINS DE TRACTION POLYCOURANT

En effet, il y a dans le monde en 1967 environ 1,3 million de kilomètres de lignes de chemin de fer, et 120 000 km électrifiés, soit moins de 10 %. La part des réseaux à courant alternatif et à courant continu est semblable, par moitié, et en alternatif on peut compter moins de 60 % de lignes électrifiées en fréquence 16 2/3 Hz, et plus de 40 % à fréquence supérieure. Au point de vue du matériel moteur à 50 Hz, on trouvait, en 1960, encore 22 % de locomotives à groupes tournants, pour 78 % à redresseurs, alors qu'en 1967, les proportions sont respectivement de 5 % et 95 %. Cette même année

1967, les engins à redresseurs à 50 et 60 Hz se partagent en 400 de type excitron, soit 8 %, 2 500 de type ignitron, soit 50 %, et 2 100 de type semi-conducteur, soit 42 %, sur un total de 5 000 locomotives et automotrices en service, y compris l'U.R.S.S. et le Japon (1). Parmi ces engins, et pour situer le polycourant, indiquons que si, en Europe seulement, il existe 9 points de contact en bitension ou bifréquence, avec moins de 50 engins spécialisés, il existe par contre 15 points de jonction bicourant avec près de 200 engins correspondants, et 5 lignes ou liaisons à usage tricourant ou quadricourant, faisant appel à 30 engins moteurs spécialisés.

Ainsi, avec les liaisons transeuropéennes qui traversent sur de faibles longueurs des réseaux électrifiés comme la Belgique ou la Suisse, pour des étapes globales de 500 à 600 km, la bivalence ne suffit plus aujourd'hui, et on doit faire alors appel à l'une des quatre catégories d'engins *trivalents*, ou même à l'engin *quadrivalent* qui devient « universel » ou à l'échelle

(1) Sur 2 100 engins à diodes semi-conductrices, il y a plus de 1 300 automotrices.

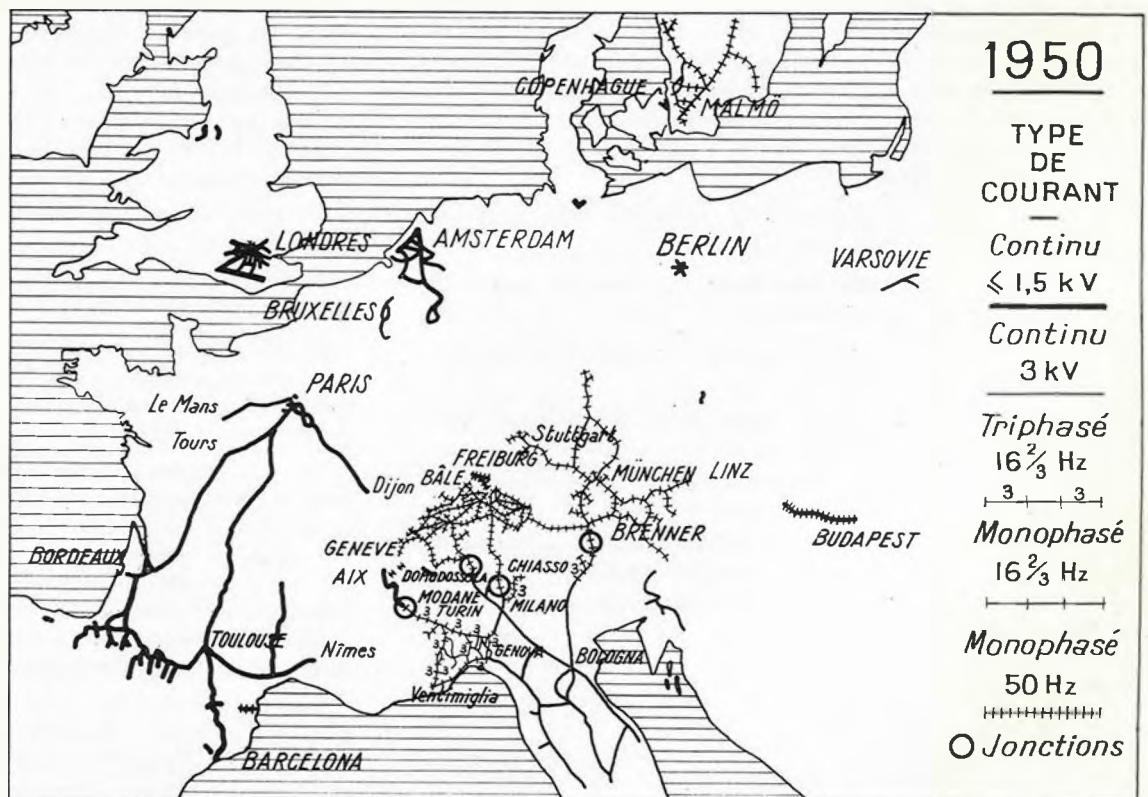
FIG. 1. — Etat de l'électrification des chemins de fer européens en 1950.

On remarque que parmi les types de courant en présence, le courant continu 1,5 kV et le courant monophasé 15 kV-16 2/3 Hz sont de beaucoup les plus développés : courant continu 1,5 kV en France, aux Pays-Bas et en Grande-Bretagne; courant monophasé 15 kV-16 2/3 Hz en Suisse, en Allemagne, en Suède et en Autriche, ainsi que sur une courte section de ligne de l'ancien réseau du Midi, en France.

Le courant continu 3 kV n'est appliqué qu'en Belgique, en Espagne et en Italie, ce dernier pays ayant aussi des lignes électrifiées en courant triphasé.

L'emploi du courant monophasé à fréquence industrielle 50 Hz est limité aux seuls lignes de Budapest à Il (Hongrie) et de Neustadt à Fribourg-en-Brisgau (Allemagne Fédérale).

L'U.R.S.S. non représentée sur cette carte avait adopté le courant continu 3 kV.



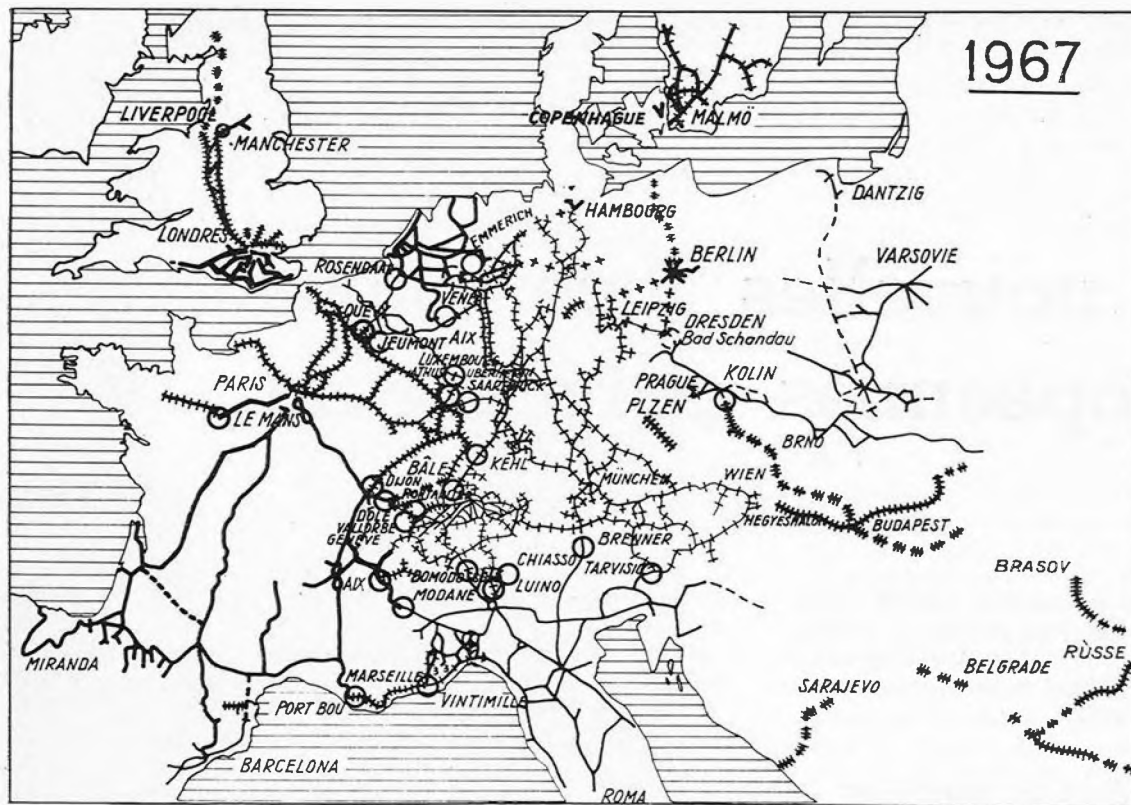


FIG. 2. — Etat de l'électrification des chemins de fer européens en 1967.

Par comparaison avec la figure 1, on remarque tout d'abord le développement considérable de l'électrification en Europe et la part prise par le courant monophasé à fréquence industrielle 50 Hz, surtout en France, en Grande-Bretagne et en Europe orientale.

La Belgique et l'Italie ont poursuivi leur électrification en courant continu 3 kV, l'Italie convertissant en courant continu 3 kV ses lignes primitivement électrifiées en courant triphasé.

La Suisse, l'Allemagne et l'Autriche ont poursuivi leur électrification en courant monophasé 15 kV-16 2/3 Hz, l'Allemagne ayant même converti en courant monophasé 15 kV-16 2/3 Hz, la section Neustadt-Fribourg-en-Brigau électrifiée en courant monophasé à fréquence industrielle.

L'U.R.S.S. qui avait adopté le courant continu 3 kV a poursuivi l'électrification de ses lignes en courant monophasé 25 kV-50 Hz.

Les systèmes en présence actuellement en Europe, y compris l'U.R.S.S. sont donc : courant continu 1,5 et 3 kV ; courant monophasé 15 kV-16 2/3 Hz et 25 kV-50 Hz.

(Le courant continu à plus basse tension 600 ou 750 V n'étant plus utilisé que sur de courtes sections de ligne, généralement de banlieue). Les nombreux points de jonction conduisent à l'emploi fréquent d'engins bitension, bifréquence ou bicourant et pour certaines relations internationales des engins polycourant (tricourant et quadricourant).

« européenne », ce qui explique d'ailleurs les qualificatifs ainsi donnés aux locomotives ou automotrices de ce type ⁽²⁾.

En suivant l'usage, et malgré l'impropriété du langage, nous appellerons donc *tricourant* et *quadricourant* ces derniers engins, mais avec la discrimination qualitative, il est aussi nécessaire d'apprécier l'importance relative de ces familles d'engins, par quelques ordres de grandeur quantitatifs.

Tout d'abord, il faut éliminer le cas des jonctions où les engins de traction sont échangés à une « gare frontière électrique », et il n'y a donc pas de « problème de traction », ou même s'ils pénètrent à la rigueur au « lancer », ou en puissance réduite, sous la ligne de contact pour laquelle leur équipement normal ne convient pas, le problème ne trouve qu'une solution très limitée. En France, après quelques essais, notamment en Savoie ⁽³⁾, de tels engins ont rapidement fait place à ceux équipés pour fournir sensiblement la même puissance, quel que soit le type d'alimentation, lesquels résolvent alors pleinement le problème de la dualité d'alimentation, et effacent donc la frontière électrique.

Par conséquent, en Europe par exemple, nous trouvons actuellement (début 1967) (fig. 1 et 2) :

— 3 points de jonction bitension ⁽⁴⁾, avec 25 engins de traction spécialisés correspondants ;

— 6 points de jonction bifréquence, avec 21 engins de traction spécialisés correspondants ;

— 15 points de jonction bicourant, avec 190 engins de traction spécialisés correspondants.

De plus les relations imposant l'usage du polycourant comportent :

— 3 lignes ou liaisons à usage tricourant, avec 7 engins de traction tricourant et 17 engins quadricourant ;

— 2 lignes ou liaisons à usage quadricourant avec 5 engins quadricourant.

Enfin, quelques gares utilisent en « pool » un parc d'engins de manœuvres polycourant, bien que l'usage spécifique en un point donné n'en soit que bifréquence ou au plus bicourant (Suisse).

Cette énumération analytique indique ainsi que pour 100 problèmes de dualités ou pluralités de traction électrique à résoudre en Europe, non compris l'U.R.S.S., nous trouvons en fait :

— 12 % de problèmes bitension et 8 % de solutions bitension ;

— 25 % de problèmes bifréquence et 9 % de solutions bifréquence ;

— 63 % de problèmes bicourant et 72 % de solutions bicourant auxquels s'ajoutent par combinaisons : 50 % des jonctions précédentes utilisées en polycourant par 11 % de solutions polycourant.

Dans un avenir proche, l'accroissement portera essentiellement sur les jonctions et les engins de traction bicourant (20 jonctions prévues et 250 engins).

De tout ceci se dégagent actuellement deux faits, et deux tendances :

1) l'importance, croissante en nombre, des engins moteurs bicourant ;

2) l'importance relative des parcours utilisant des engins polycourant, avec beaucoup de jonctions utilisées par un nombre réduit d'engins quadricourant, mais encore très supérieurs en nombre aux « bitension » et aux « bifréquence ».

Dans la plupart des cas cependant, ces locomotives ou automotrices polycourant sont utilisées sur un seul parcours en bi ou au plus en tricourant, les seules exceptions étant actuellement les parcours quadricourant Paris-Milan et Amsterdam-Zurich. En fait les engins polycourant sont généralement utilisés universellement au cours d'un même roulement de service, sur des parcours différents, où ils utilisent tantôt l'une ou l'autre des quatre combinaisons possibles.

Que peut-on déduire de ce panorama d'ensemble de la situation européenne, à laquelle devraient s'ajouter l'U.R.S.S., le Japon, et les Etats-Unis complétant le total actuel mondial à environ 40 jonctions bicourant, et plus de 500 engins de trac-

(2) Voir le *Génie Civil* des 15 juin, 1^{er} et 15 juillet, 1^{er} et 15 août 1962.

(3) Voir le *Génie Civil* du 15 octobre 1951.

(4) Grande-Bretagne exclue avec le 6,25/25 kV en 50 Hz, ainsi que la Hongrie avec 16 et 25 kV-50 Hz, dont l'unification est prévue dans les deux cas en 25 kV.

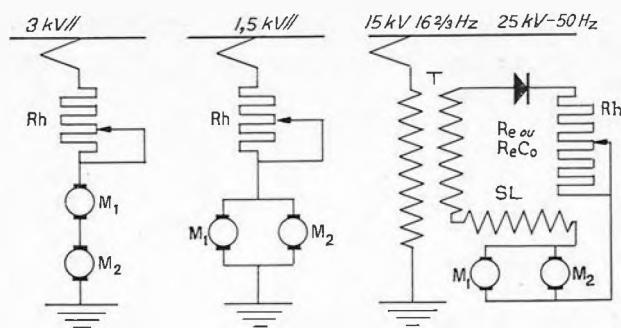


FIG. 3. — Schémas de principe simplifiés d'un engin de traction quadricourant à deux moteurs (BB à bogies monomoteurs) ou deux groupes de deux moteurs (BB à moteurs individuels), alimenté en courant continu 3 kV (à gauche) ou 1,5 kV (au centre), ou en courant monophasé 15 kV-16 2/3 Hz ou 25 kV - 50 Hz (à droite).

M_1 et M_2 , moteurs ou groupes de deux moteurs ; — Re et $ReCo$, redresseur semi-conducteur simple ou contrôlé ; — Rh , rhéostat de démarrage ; — SL , self de lissage ; — T , transformateur.

tion (5). En fait, on peut constater la primauté des électrifications *bicourant* (alternatif-continu) due essentiellement au fait que la plupart des réseaux ayant commencé leur électrification en courant *continu*, la poursuivent aujourd'hui en courant *alternatif* à fréquence industrielle à cause des économies et des avantages de traction procurés par ce dernier système, alors que les réseaux ayant commencé et largement entamé leur électrification en *alternatif* à fréquence réduite, la poursuivent dans ce système autant par habitude et désir d'homogénéité, que par la crainte, peu fondée, des complexités dues à l'usage de la bifréquence. Par ailleurs, les réseaux ayant terminé, ou presque, leur électrification (Suisse, Italie, Pays-Bas, Belgique) n'ont évidemment à se poser que des problèmes de réalisation d'engins *polycourant* puisqu'ils rencontrent plusieurs systèmes de traction à leurs frontières, et nous verrons qu'une fois le *bicourant* résolu, on peut presque dire que les autres variantes sont données, ou tout au moins autorisées par surcroît. En effet, quel que soit le courant de base utilisé, alternatif ou continu, les variantes dites bifréquence ou bitension sont techniquement simples à résoudre, sans modification du schéma de base de l'engin moteur :

— En *bitension*, c'est-à-dire avec deux tensions différentes comme 25 kV et 16 kV en alternatif 50 Hz en Hongrie ou 25 kV et 6,25 kV en Grande-Bretagne, ou encore entre 3 kV et 1,5 kV en continu entre Pays-Bas et Belgique, France et Italie et en Espagne, le problème se résout par une question d'appareillage, aussi bien côté puissance que côté auxiliaires :

— commutateur de prises au transformateur en alternatif ;
— couplages en continu avec isolement à la masse pour la tension la plus élevée, en fait 3 kV.

— En *bifréquence*, c'est-à-dire en fait entre 16 2/3 Hz et 50 Hz en Europe, le schéma est aussi simple, bien qu'en principe le changement de fréquence soit aussi accompagné d'un changement de tension : 15 kV contre 25 kV. Ce dernier est résolu par un commutateur de prises, et pour le reste, c'est la fréquence la plus basse qui commande les dimensions des appareils à induction, transformateur et selfs, l'augmentation de fréquence étant un multiplicateur gratuit de l'induction, et d'ailleurs d'une partie de la différence des tensions.

Par conséquent, si l'engin bitension dérive de celui à la tension la plus élevée, avec un appareillage supplémentaire, l'engin bifréquence dérive de celui à la fréquence la plus basse (6), également avec un supplément d'appareillage (fig. 3).

Le problème essentiel à la base des réalisations dites de traction universelle reste donc le *bicourant*, alternatif plus continu

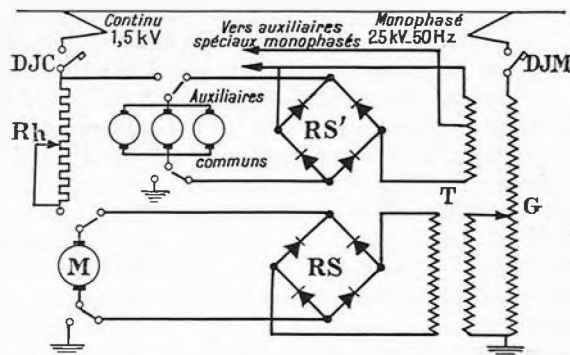


FIG. 4. — Schémas de principe simplifiés d'engins de traction bicourant à juxtaposition des équipements courant continu et courant monophasé (bicourant à part entière) (en haut) et à alimentation de l'équipement à courant continu par un transformateur à rapport fixe (sous station mobile) (en bas).

Pour la clarté du schéma, un seul moteur de traction est représenté, mais les schémas s'appliquent aussi bien au cas d'engins BB à bogies monomoteurs ou à moteurs individuels.

DJC, disjoncteur courant continu ; — DJM, disjoncteur courant monophasé ; — G, autotransformateur-gradateur ; — M, moteurs de traction ; — Rh , rhéostat de démarrage ; — RS et RS' redresseurs semiconducteurs silicium ; — T , transformateur à rapport fixe.

(fig. 4), qui en fait couvre quatre possibilités de principe, en Europe, étant donné l'existence de deux tensions en continu et de deux fréquences en alternatif :

50 Hz et 3 kV [1]	16 2/3 Hz et 3 kV [3]
50 Hz et 1,5 kV [2]	16 2/3 Hz et 1,5 kV [4]

Or, compte tenu de ce que nous avons dit à propos des engins bitension et bifréquence, on voit facilement que le seul problème difficile entre tous est bien celui du cas numéro 3 — à savoir la *tension continue la plus élevée* (3 kV) avec la *fréquence alternative la plus basse* (16 2/3 Hz). Ce cas n'est d'ailleurs pas théorique, c'est celui qui existe déjà en cinq points de jonction en Europe, entre Belgique et Allemagne, Suisse ou Autriche, et Italie, et qui existe ou existera plus simplement entre 3 kV et 50 Hz, à l'intérieur des réseaux d'U.R.S.S., de Tchécoslovaquie, de Yougoslavie, voire en maille interne de certains réseaux ayant débuté en continu, et aux jonctions futures entre pays d'Europe de l'Est comme Allemagne et Pologne, par exemple.

En résumé, les locomotives quadricourant (continu 1,5 et 3 kV, monophasé 15 kV-16 2/3 Hz et 25 kV-50 Hz) sont sensiblement plus lourdes et plus coûteuses que les locomotives tricourant (continu 1,5 et 3 kV, monophasé 25 kV-50 Hz) en raison de la fréquence 16 2/3 Hz qui nécessite un transformateur et des selfs de lissage plus importants qu'à fréquence 50 Hz, mais pour cette même raison elles ne sont pas beaucoup plus lourdes, ni plus coûteuses que les locomotives bicourant (continu 3 kV, monophasé 15 kV-16 2/3 Hz). Le

(5) Dont plus de 100 automotrices aux Etats-Unis et 150 au Japon.

(6) Sauf évidemment s'il s'agit d'un engin à moteurs directs à collecteurs, où les moteurs devront être calculés d'abord pour la fréquence la plus élevée, mais ceci ne concerne en fait que deux locomotives pour toute l'Europe.

TYPE	Courant continu (1,5 kV)	Courant alternatif (25 kV)	Bicourant (1,5 - 2,5 kV)	Tricourant (1,5 - 3 - 25 kV)	Quadricourant (1,5 - 3 - 15 - 25 kV)
Partie mécanique % :					
Caisse	25	25	24	24	24
Bogie	25	36	35	33	35
Total partie mécanique %	61	61	59	57	59
Partie électrique % :					
Moteurs de traction	14	14	14	16	15
Selfs de lissage	—	1	1	2	2
Redresseur	—	1	1	1	1
Bloc rhéostat et appareillage	6	—	6	10	6
Transformateur (et gradateur éventuel)	—	14	13	9	12
Auxiliaires et câblage	10	8	6	4	5
Lest et divers	9	1	—	—	—
Total partie électrique (sans lest) % ..	30	38	41	42	41
Exemples S.N.C.F.	BB 8 500	BB 17 000	BB 25 500	BB 30 000	CC 40 100
(et variantes)	BB 9 400	BB 16 500	BB 25 100	BB 150 (S.N.C.B.)	BB 160 (S.N.C.B.)
Masse totale correspondante (t)	60 à 78	73 à 78	76 à 84	69 (à 84)	109 (à 85)

La masse totale, partie mécanique plus partie électrique est de 100 dans tous les cas en raison de la présence de 1 à 9 % de lest et approvisionnements (huile, sable), notamment dans le cas des engins à courant continu.

TABLEAU I. — *Masses relatives de locomotives monocourant et polycourant comparables (2 600 à 3 600 kW)*

tableau I donne les masses relatives de locomotives monocourant et polycourant comparables. En effet, le passage du fonctionnement en courant continu 3 kV au fonctionnement sous 1,5 kV nécessite seulement un simple changement de couplage série-parallèle et le passage du fonctionnement en courant monophasé 15 kV-16 2/3 Hz au fonctionnement en monophasé 25 kV-50 Hz se ramène à une simple commutation au secondaire du transformateur, puisque, au point de vue de l'induction, un transformateur 15 kV-16 2/3 Hz est équivalent à un transformateur 45 kV-50 Hz.

La construction de locomotives quadricourant est donc relativement plus avantageuse que la construction de locomotives bicourant (continu 3 kV-monophasé 15 kV-16 2/3 Hz), car pour un faible surcroît de dépense elles offrent des possibilités d'exploitation beaucoup plus larges en permettant d'assurer toutes les relations internationales.

D'une manière générale, les schémas d'engins aptes à circuler sous plus de deux systèmes d'alimentation s'obtiennent en associant les trois schémas types : bitension, bifréquence et bicourant. On peut encore dire que ce sont des types bicourant généralisés à deux tensions et à deux fréquences.

Les difficultés de réalisation de ces engins résultent d'une part des impératifs de poids et d'encombrement, d'autre part des problèmes de captation du courant.

Au point de vue du poids, on constate qu'à égalité de masse, on réalise une plus forte puissance avec des bogies monomoteurs qu'avec des bogies à entraînement individuel des essieux. Ce fait est remarquablement illustré par les deux locomotives BB 30 001 et 2 dont la tare est seulement de 69 t et qui remorquent les rames Trans-Europ-Express Paris-Bruxelles-Amsterdam à égalité de charge et d'horaire avec les BB 150 dont la tare est de 77 t.

Au point de vue de la captation du courant rappelons que le calcul d'un pantographe fait intervenir de nombreux paramètres, dont les principaux sont : l'intensité à capter ; — la pression dynamique maximale pouvant être appliquée sur la caténaire ; — la nature, la hauteur et le désaxement du fil de contact ; — les distances d'isolement.

Ces paramètres variant considérablement d'un système de traction à l'autre et même dans certains cas d'un réseau à un autre, il n'est pas possible de déterminer un pantographe passe-partout et il est généralement nécessaire de monter plusieurs types d'appareils sur un même engin polycourant.

Le nombre et la spécialisation de ces pantographes sont déterminés, moyennant parfois quelques compromis, en tenant compte de ce que certains critères qui sont liés au gabarit des caténaires sont impératifs, alors que d'autres qui dépendent du captage du courant ne le deviennent qu'au-delà de certaines limites de vitesse. Dans les cas où les pantographes sont connectés directement sur la ligne de toiture ou peuvent être utilisés indifféremment en courant continu ou en courant alternatif, un sectionneur de séparation est prévu avant la traversée de toiture courant continu afin de ne pas lui appliquer les tensions 15 ou 25 kV pour lesquelles elle n'est pas prévue.

Afin d'éviter toute fausse manœuvre qui serait très dommageable pour le matériel, tous les engins polycourant sont équipés d'un dispositif de palpage qui commande les commutateurs de préparation des circuits et par ses asservissements libère le fonctionnement du disjoncteur adéquat et éventuellement le sectionneur de séparation.

Bien que ce problème bicourant continu 3 kV - alternatif 16 2/3 Hz, le plus difficile à résoudre, ne concerne encore qu'une trentaine d'engins de traction en Europe, représentés en fait par les réalisations polycourant qui en dérivent, nous le détaillerons davantage puisqu'il représente la base même des combinaisons entre alternatif et continu.

Le redresseur, organe fondamental des engins de traction bicourant

L'engin de traction, locomotive ou automotrice, de type bicourant, n'est pratiquement apparu et devenu rationnel que grâce au redresseur. On a pu dire à juste titre, qu'il s'agissait là de la seconde victoire du redresseur, la première étant la généralisation des électrifications en courant alternatif à fréquence industrielle. Le redresseur est ici en quelque sorte le catalyseur de la combinaison.

Rappelons, en effet, qu'avec des moteurs directs à courant alternatif monophasé, les tensions nominales de quelques centaines de volts (500 V à fréquence 16 2/3 Hz et 250 V à fréquence 50 Hz) sont très éloignées des 1 500 V des moteurs à courant continu. Il y a donc incompatibilité, sauf si le moteur à courant continu peut être alimenté en courant redressé à la tension désirée, ce que permet le redresseur, d'où une première conception bicourant :

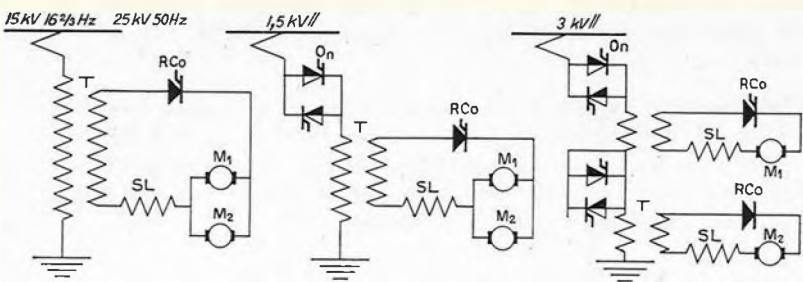


FIG. 5. — Schémas de principe simplifiés d'un engin de traction quadricourant à deux moteurs (BB ou CC à bogies monomoteurs) ou deux groupes de deux moteurs (BB à moteurs individuels) dérivé d'un engin de traction à courant monophasé redressé, alimenté en courant monophasé (à gauche) en courant continu 1,5 kV (au centre) ou 3 kV (à droite).

M₁ et M₂, moteurs de traction ; — On, onduleurs ; — R Co, redresseurs ; — SL, selfs de lissage ; — T, transformateur à rapport fixe.

— concevoir la locomotive comme un engin à courant continu, recevant en alternatif une tension redressée, et réglée ou non, par adjonction d'un groupe transformateur-redresseur ; ceci impose donc en alternatif, la conversion de puissance, sous forme de continu à tension maximale imposée (fig. 4).

D'un autre côté, on cite à juste titre la locomotive à courant alternatif redressé comme susceptible de choisir librement la tension de ses moteurs de traction, au mieux de leur puissance. Or quand on est libre, et quel que soit le nombre de moteurs, on choisit généralement 750 à 1 500 V, et jamais 3 000 V. Par conséquent, il pourrait exister dans la plupart des cas une servitude, qui serait levée si l'engin sous caténaire à courant continu pouvait alimenter ses moteurs de traction à 1 000 V et au plus à 1 500 V. Ceci demande en fait une transformation en alternatif, pour abaissement, puis redressement de la tension, ce que permet encore le redresseur, contrôlé cette fois. D'où une seconde conception possible.

— concevoir la locomotive comme un engin à courant alternatif-redressé, recevant, en cas d'alimentation sous continu, une tension ondulée en alternatif à fréquence « libre » par un groupe transformateur-onduleur (fig. 5). Le moteur de traction reçoit évidemment dans tous les cas un courant redressé quasi continu, mais à une tension « libre », choisie et prédéterminée au mieux à partir du moteur de traction. Bien qu'à priori très séduisante, cette théorie fait apparaître la double transformation et conversion du courant à bord de l'engin moteur. quand il est alimenté sous courant continu, puisque l'on convertit une première fois la puissance en courant alternatif, avant de la régler en tension pour la reconvertir une seconde fois en redressé, c'est-à-dire en fait continu. Au contraire, la première solution, bien qu'elle demande aussi le dédoublement de l'installation de puissance, ne nécessite pas un double équipement de conversion, puisque dans un cas (en continu) on utilise le courant tel qu'il est, sans transformation, avec la seule limitation d'intensité et de tension procurée par des résistances et des couplages de moteurs ; un tel équipement n'est pas comparable à un onduleur-redresseur statique.

On ne peut donc dire que les deux solutions en présence, schématisées à la figure 5, soient comparables ou même symétriques du point de vue équipement, bien qu'elles semblent l'être en théorie. Ainsi, il est infiniment plus facile, plus simple et moins coûteux en pratique de faire à partir d'un engin à courant continu, un bicourant même à part entière ⁽⁷⁾ que d'obtenir le même résultat à partir d'un engin à courant alternatif, ce qui ne veut pas dire que ce dernier soit irréalisable, ni impensable, pour l'avenir.

Nous décrirons donc tout spécialement les plus récents engins de cette famille, bien que sur un total de plus de 500 engins bicourant ou polycourant dans le monde, il n'y en ait encore

que 3 qui appartiennent au type dérivé de l'alternatif, tous les autres étant de types soit dérivés directement du continu soit par juxtaposition d'une « petite sous-station mobile », soit par juxtaposition d'un double équipement, alternatif et continu, ce dernier assurant en plus les fonctions de freinage électrique rhéostatique quel que soit le type de courant en ligne. Dans ce dernier cas, et pour éviter toute confusion, on ne peut dire à proprement parler que la locomotive « dérive » d'un type plutôt que d'un autre, et bien que nous l'ayons d'abord classée en première approximation dans les engins issus du courant continu, nous constatons la nécessité d'introduire une division spéciale pour les locomotives disposant d'un double équipement intégral bicourant, et dont les exemplaires réalisés, de loin les plus nombreux sont de type français (séries BB 25 100, 25 150, 25 200 et 25 500) (courant continu 1,5 kV et monophasé 25 kV-50 Hz), en service sur la ligne Paris-Le Mans-Rennes électrifiée en 1937 en courant continu 1,5 kV entre Paris et Le Mans et depuis 1965 entre Le Mans et Rennes en courant monophasé 25 kV-50 Hz, ainsi que sur la ligne Paris-Dijon-Dôle-Pontarlier et Vallorbe (courant continu 1,5 kV de Paris à Dôle, monophasé 25 kV-50 Hz de Dôle à Pontarlier et Vallorbe), et entre Marseille et Les Arcs (courant continu 1,5 kV de Marseille à Blancarde, monophasé 25 kV-50 Hz de Blancarde aux Arcs, enfin sur la ligne Dijon-Neufchâteau.

Dans le courant de l'année prochaine, la S.N.C.F. disposera de 143 locomotives bicourant et de 12 locomotives polycourant se répartissant comme suit :

Bicourant	{	91 unités des types BB 25 100, 25 150 et 25 200.
		55 unités du type BB 25 500.
		2 unités du type CC 21 000.
Polycourant	{	2 unités tricourant du type BB 30 000.
		10 unités quadricourant du type CC 40 100.

Le problème de la réalisation des engins de traction polycourant étant ainsi exposé, nous rappelons tout d'abord que les premiers engins de traction quadricourant mis en service furent les trains automoteurs RAe 1051 à 4 des Chemins de fer Fédéraux Suisses, qui assurent, depuis 1961, les relations Trans-Europ-Express Paris-Milan, Zurich-Milan et Zurich-Amsterdam, suivis peu après par les locomotives BB 30 001 et 2 (ex-26 001 et 2) de la S.N.C.F., puis par les BB 150 de la S.N.C.B., en service depuis 1964 sur la même relation. Ces engins relèvent tous de la conception de l'engin polycourant dérivé de l'engin à courant continu qui devait bien normalement être la première appliquée car la mise en œuvre d'un redresseur est plus simple que celle d'un onduleur et la technique des redresseurs a précédé celle des onduleurs.

Nous étudierons donc tout d'abord les engins polycourant dérivés des engins à courant continu. Les trains automoteurs RAe 1051 à 4 des Chemins de fer Fédéraux Suisses et les locomotives BB 30 001 et 2 de la S.N.C.F. ayant été décrits dans un premier article sur les engins polycourant paru dans le *Génie Civil* des 15 juin, 1^{er} et 15 juillet, 1^{er} et 15 août 1962, et les locomotives BB 150 de la S.N.C.B. dans le *Génie Civil* des 1^{er} mars et 1^{er} avril 1964, nous décrirons successivement les locomotives quadricourant CC 40 100 de la S.N.C.F. et BB 160 de la S.N.C.B. Nous aborderons ensuite l'étude des engins polycourant dérivés des engins à courant monophasé redressé qui sont actuellement représentés par les locomotives BB de la série E 410 du Chemin de fer Fédéral Allemand.

Ces deux derniers types de locomotives ont été particulièrement construites en vue des services sur les liaisons récemment électrifiées Cologne-Liège-Bruxelles et Cologne-Amsterdam, ultérieurement Paris-Liège-Cologne ⁽⁸⁾.

(7) C'est-à-dire avec variation de tension par autotransformateur-gradateur, par prises au secondaire ou par redresseurs contrôlés

(8) Avec rebroussement à Liège en cas d'arrêt à cette gare.

Sur ces dernières lignes malgré un tracé souvent peu favorable en Belgique, les vitesses maximales sont généralement comprises entre 140 et 160 km/h, et le profil est relativement facile à l'exception de points singuliers comportant des rampes atteignent 16 ‰, mais de courtes longueurs, notamment au départ d'Aix-la-Chapelle et en Belgique. Toutefois, la charge des trains rapides, assez réduite, a permis de se limiter au type BB avec un poids total admis d'environ 84 t, soit 21 t par essieu, alors que les précédents engins polycourant, trains automoteurs Cisalpin des Chemins de fer Fédéraux Suisses, locomotives BB 30 000 et CC 40 100 de la S.N.C.F. ne dépassaient pas 18 t par essieu, charge limite primitivement imposée pour les services Trans-Europ-Express.

LOCOMOTIVES CC 40 100 DE LA S.N.C.F.

Ces locomotives réalisées au nombre de 4 en présérie dès 1964 seront complétées à la dizaine par la construction en cours de 6 locomotives en dérivant. De plus leur partie mécanique et certains éléments électriques vont servir de base à la construction en séries importantes de locomotives CC à grande puissance, de l'ordre de 5 500 kW, et à grande vitesse puisque la biréduction permet d'atteindre les vitesses de 160 et 240 km/h par changement de rapport d'engrenages à l'arrêt.

Les locomotives CC 40 101 à 4 ont été envisagées au départ pour remorquer des rames Trans-Europ-Express de plus de 600 t, pour lesquelles la puissance des locomotives tricourant BB 30 000 et BB 150 était juste. De plus comme nous l'avons précédemment indiqué, une fois résolu le problème du bicourant (continu 3 kV et monophasé 15 kV-16 2/3 Hz), les marches sous courant continu 1,5 kV et monophasé 25 kV-50 Hz ne sont que des variantes bitension et bifréquence relativement simples et peu coûteuses à obtenir à l'intérieur de l'équipement « enveloppe », le plus difficile à résoudre. Les locomotives ont donc été conçues pour développer leur pleine puissance d'au moins 3 700 kW au régime continu quel que soit le mode d'alimentation de la caténaire, étant entendu que le schéma de base était

celui d'une locomotive à courant continu, alimentée à tension fixe alternative redressée à partir du monophasé 16 2/3 ou 50 Hz.

Elles ont été étudiées par la Société Alsthom en liaison avec la Division des Etudes de Traction Electrique de la S.N.C.F. et construites par la Société Alsthom tant pour la partie mécanique que pour la partie électrique (fig. 6 à 8). Leurs principales caractéristiques sont les suivantes :

TABLEAU II. — Principales caractéristiques des locomotives quadricourant de la série CC 40 100 de la S.N.C.F.

Longueur hors tampons	(m)	20,030
Longueur de caisse	(m)	21,120
Largeur hors tout	(m)	2,820
Empattement des bogies	(m)	3,216
Entraxe des bogies	(m)	14,340
Hauteur de la toiture	(m)	3,617
Diamètre des roues	(m)	1,080
Masse en ordre de marche	(t)	107
Charge par essieu	(t)	17,83
Régime continu	Puissance	(kW) 3 670
	Effort aux jantes réduction PV (kN)	115,60
	Effort aux jantes réduction GV (kN)	84,28
	Vitesse réduction PV	(km/h) 110
	Vitesse réduction GV	(km/h) 153,5
Régime unihoraire	Puissance	(kW) 3 850
	Effort aux jantes réduction PV (kN)	124,46
	Effort aux jantes réduction GV (kN)	89,1
	Vitesse réduction PV	(km/h) 108,5
	Vitesse réduction GV	(km/h) 151,5
Vitesse maximale	réduction PV (km/h)	160
	réduction GV (km/h)	240
Effort aux jantes pour la vitesse maximale	réduction PV (kN)	80,85
	réduction GV (kN)	54,88

Les figures 9 à 11 montrent leurs performances.

Nous décrirons successivement la partie mécanique et la partie électrique.

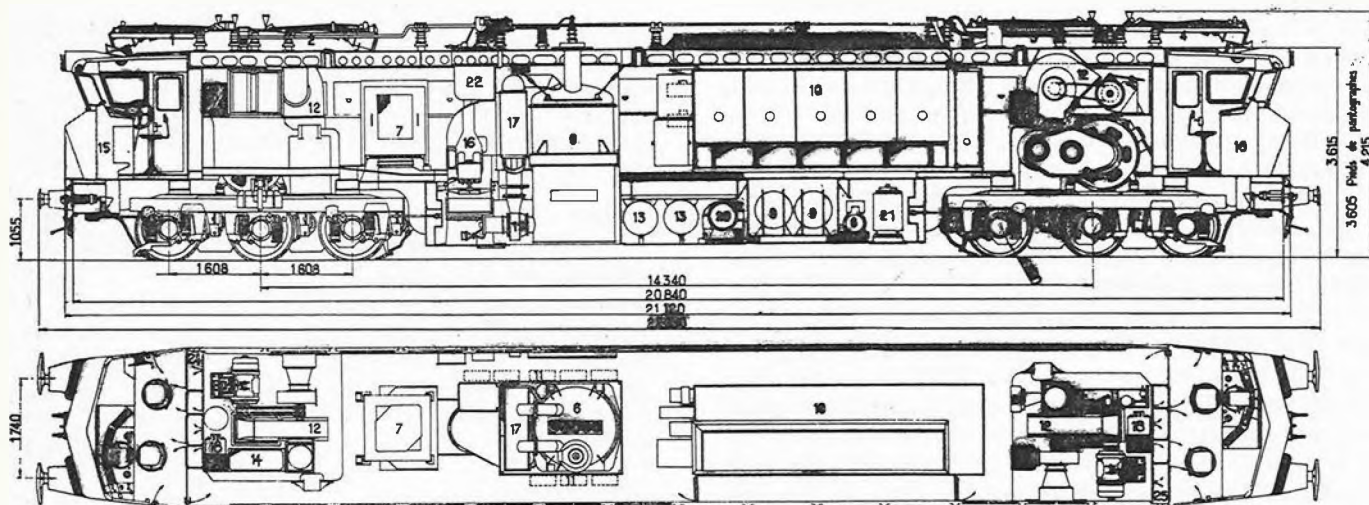


FIG. 6 et 7. — Coupes verticale et horizontale d'une locomotive quadricourant CC 40 100.

1, pantographe 25 kV, 50 Hz S.N.C.F.-C.F.L. et 3 kV FS ; — 2, pantographe 1,5 kV S.N.C.F.-N.S. et 3 kV S.N.C.B.-C.F.L. ; — 3, pantographe 15 kV, 16 2/3 Hz C.F.F. ; — 4, pantographe 15 kV, 16 2/3 Hz D.B.-O.B.B. ; — 5, disjoncteur monophasé ; — 6, transformateur principal ; — 7, redresseur ; — 8, groupe moto-alternateur pour alimentation du moteur de la pompe de circulation d'hexafluorure de soufre du transformateur ; — 9, selfs de lissage ; — 10, bloc traction (contacteurs et résistances de démarrage) ; — 11, appareillage robinet de mécanique ; — 12, ventilateurs de moteurs de traction ; — 13, réservoirs d'air comprimé ; — 14, bloc d'alimentation des auxiliaires de marche en courant monophasé ; — 15, pupitre de commande ; — 16, groupe moto-ventilateur du réfrigérant de la circulation d'hexafluorure de soufre du transformateur ; — 17, réfrigérant du transformateur ; — 18, shunts inductifs ; — 19, groupe moto-pompe de circulation de l'hexafluorure de soufre pour le refroidissement du transformateur ; — 20, groupe moto-compresseur de l'équipement de freinage ; — 21, transformateur d'alimentation des auxiliaires de marche en courant monophasé ; — 22, transformateur de palpage ; — 23, redresseur d'alimentation des auxiliaires ; — 24, armoire pour le personnel de conduite ; — 25, équipement de répétition des signaux.

FIG. 8. — Locomotive quadricor-rant de la série CC 40 100 de la S.N.C.F.

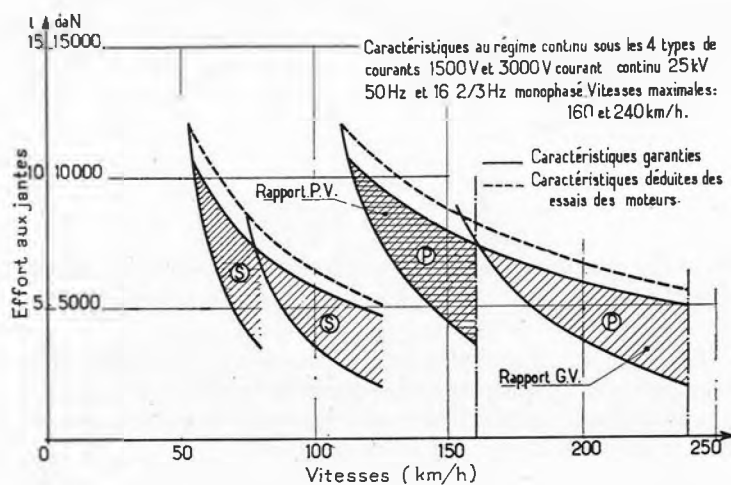


FIG. 9. — Caractéristiques effort-vitesse des locomotives CC 40 100.

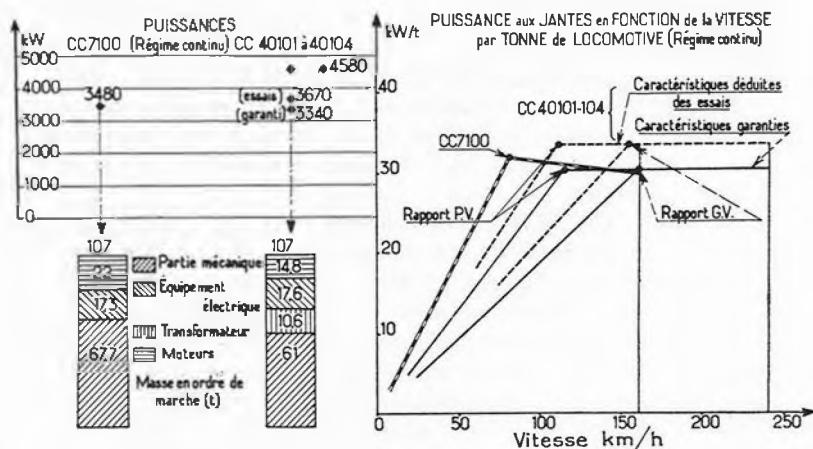


FIG. 10. — Comparaison des puissances aux jantes en fonction de la vitesse et répartition des poids des locomotives CC 7 100 et CC 40 100.

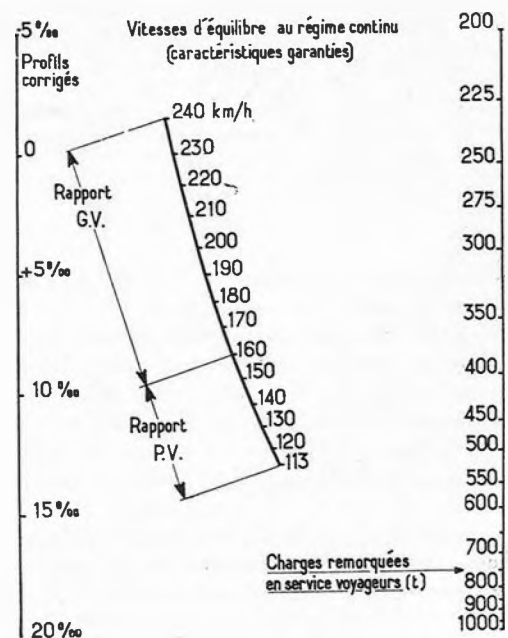


FIG. 11. — Abaque des vitesses d'équilibre en régime continu pour les rapports grande vitesse et petite vitesse.

Partie mécanique

La partie mécanique de ce type de locomotives se distingue, particulièrement, par la construction de la caisse et des bogies. La première a dû être spécialement étudiée pour rester dans les limites de charge par essieu imposées malgré l'importance de l'équipement et la longueur qu'elle entraîne, sans rien sacrifier de la résistance. Les seconds sont les premiers bogies mono-moteurs à trois essieux après ceux de la locomotive prototype CC 10 002.

Caisse. — La masse des éléments d'équipement électrique, notamment celle du transformateur qui doit être établi pour

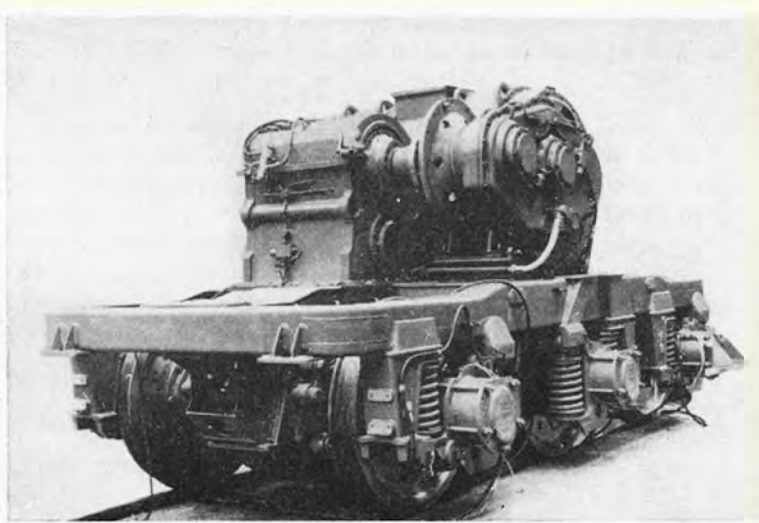
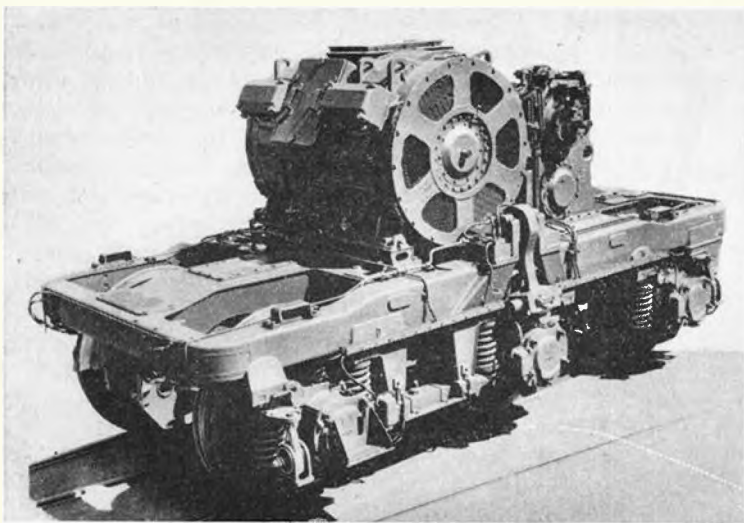


FIG. 12 et 13 — Bogie monomoteur des locomotives quadricourant CC 40 100 vu du côté moteur (à gauche) et du côté réducteur (à droite).

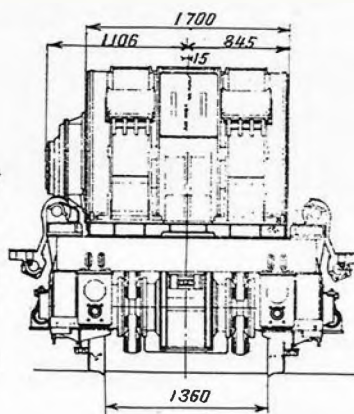
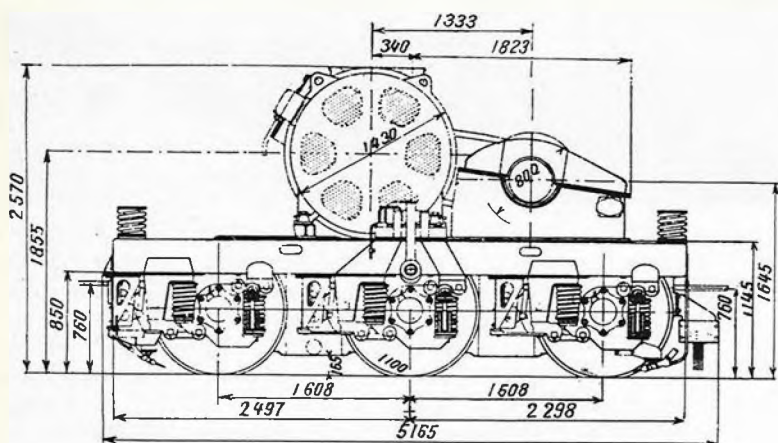


FIG. 14 et 15. — Coupes longitudinale et transversale du bogie monomoteur des locomotives quadricourant CC 40 100.

la pleine puissance à la fréquence $16 \frac{2}{3}$ Hz, imposait de limiter le poids de la caisse au voisinage de 15 t, soit seulement 710 kg au mètre. On était ainsi naturellement conduit à une caisse du type monocoque à revêtement travaillant de même conception que celles des locomotives BB 8 100 et CC 7 100, mais en différant toutefois par son exécution en double paroi travaillante à la partie inférieure en raison des grandes ouvertures nécessaires à la partie supérieure pour la ventilation, ainsi que par l'emploi d'acier Cor-Ten faiblement allié, soudable et à haute limite élastique, à l'exception toutefois de la face frontale de chaque extrémité de traverse de tête qui est en acier doux au carbone. Les brancards sont en tôle de 6 mm d'épaisseur pour les éléments principaux et en tôle de 2 mm pour les armatures et les éléments secondaires. Le caisson du pavillon et les cabines sont également en tôle de 2 mm d'épaisseur. Les faces latérales sont constituées de tôles de 1,5 mm d'épaisseur en double paroi travaillante.

La concentration de la puissance en un seul moteur par bogie s'accompagne naturellement d'un plus grand diamètre du moteur qui ne permet plus de le loger entièrement sous le châssis de caisse comme sur de nombreux types de locomotives, et dans le cas d'un bogie à trois essieux la position centrale du moteur, adoptée en vue d'assurer une bonne tenue de voie, impose sa surélévation en raison de l'essieu central. En conséquence, le plancher est largement échancré au-dessus de la partie des bogies portant le moteur et le réducteur à deux rapports.

Des panneaux démontables sont prévus sur le pavillon pour la mise en place ou l'extraction du transformateur et des blocs d'appareillage, à la partie inférieure de la caisse sous le châssis pour certains éléments d'appareillage. Par ailleurs, les collec-

teurs des moteurs de traction sont accessibles depuis les cabines de conduite, puisqu'ils occupent les parties de caisse immédiatement au-delà (fig. 6).

Le profil des extrémités qui se caractérise par l'inclinaison vers l'extérieur de la partie supérieure de la cabine a été adopté pour supprimer toute réflexion des appareils du pupitre de commande dans les glaces des baies frontales.

Les appareils de choc et de traction sont fixés sur les traverses de tête. Les crochets de traction de 100 t et les tendeurs d'attelage de 85 t sont du type unifié. Les tampons sont hydrauliques à grande capacité d'absorption.

La construction de la caisse est effectuée en éléments préfabriqués, châssis, cabines, faces latérales, qui sont assemblés ensuite par soudure.

Bogies. — Les figures 12 à 15 montrent la disposition du bogie avec le moteur entièrement suspendu au centre du châssis, au-dessus de l'essieu central et le réducteur à deux rapports avec dispositif de changement de rapport manœuvrable seulement à l'arrêt.

Le châssis de construction soudée, est constitué de deux longerons et de deux traverses à section en caisson ; il est entretoisé transversalement par les deux traverses qui portent le moteur et longitudinalement par le bâti du réducteur.

La suspension primaire est à ressorts hélicoïdaux avec amortisseurs à friction, suivant la disposition représentée sur la figure 12. Les boîtes d'essieux sont guidées sans frottement et sans jeu par des biellettes à silentblocs suivant la disposition utilisée sur les locomotives CC 7 100 et de nombreux autres types à grande vitesse. Elles sont du type à fusée extérieure, à rouleaux cylindriques, lubrifiées à la graisse avec déplacement

contrôlé de l'essieu à chacune de ses extrémités par un bloc élastique en caoutchouc.

La suspension secondaire est pendulaire. La charge de la caisse est transmise à chacun des bogies par deux bielles pendulaires avec double articulation côté attache de caisse et rotule côté attache sur bogie ainsi que par deux appuis élastiques disposés à chacune des extrémités de bogie dans l'axe longitudinal. Dans le cas de rupture d'une pièce de la suspension des butées ont été prévues pour s'opposer à un affaissement excessif de la caisse.

Le déplacement transversal caisse-bogies est limité par des butées à 60 mm de part et d'autre de la position médiane.

Le frottement des rotules des bielles pendulaires de suspension secondaire et le frottement des appuis élastiques de caisse sur les extrémités de bogies constituent le dispositif anti-lacet.

L'entraînement de la caisse est assuré par des barres de traction avec un jeu suffisant aux attaches sur la caisse pour éviter le travail en compression de la barre avant et laissant ainsi toute liberté d'orientation du bogie dans les courbes.

L'entraînement des essieux est bilatéral et la transmission du couple de l'arbre creux à l'essieu est du type Alsthom à anneau dansant déjà utilisé sur les locomotives CC 7100 et sur de nombreux types de locomotives électriques et Diesel électriques en service en France et à l'étranger. L'accouplement est intérieur aux roues comme sur les CC 7100 et non extérieur comme sur les BB 16 500 et le prototype CC 10 002.

La transmission du couple, de l'arbre de l'induit aux arbres creux d'entraînement des essieux, s'effectue par un premier train de trois engrenages, 30, 53 et 27 dents enfermé dans un petit carter latéral au moteur et attaquant, par l'intermédiaire d'un accouplement élastique Citroën Flexacier, le bloc de changement de rapport de réduction, lequel attaque les arbres creux d'essieux par l'intermédiaire d'un train d'engrenages (fig. 16) constitué de deux roues d'accouplement de 71 dents

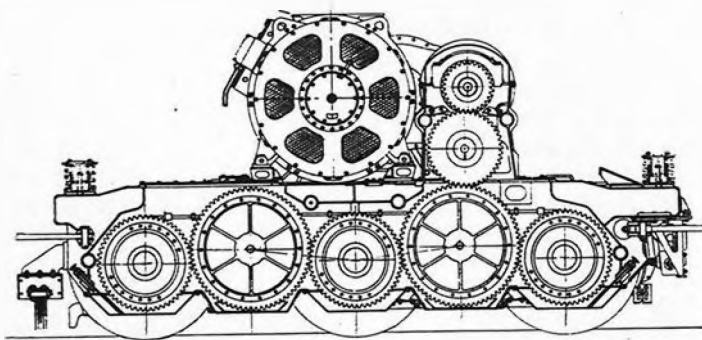


FIG. 16. — Coupe longitudinale de bogie monomoteur des locomotives quadricourant CC 40100 montrant la disposition de la transmission de la boîte de changement de rapport aux essieux.

et des trois couronnes dentées d'arbre creux des essieux, une des roues d'accouplement étant entraînée par la roue de sortie du bloc de changement de rapport de réduction comme on le voit sur les figures 16 et 17, cette dernière représentant la chaîne cinématique de l'arbre du moteur à la roue d'accouplement.

Le bloc de changement de rapport de réduction est d'une conception assez particulière, entièrement différente du dispositif à « basculeur » des locomotives BB 16 500, 17 000 et 25 500 et du prototype CC 10 002. C'est un dispositif à crabotage d'un plateau P porté par l'arbre d'entrée AE, en sa partie médiane, sur l'un ou l'autre des plateaux crénelés P₁ P₂ de deux arbres creux entourant l'arbre d'entrée et portant chacun le pignon d'un rapport de réduction (29 dents pour la vitesse maximale 160 km/h et 35 dents pour la vitesse maximale 240 km/h), ces deux pignons engrénant chacun sur un pignon de l'arbre de sortie AS (44 dents pour la vitesse maximale 160 km/h et 38 dents pour la vitesse maximale 240 km/h), le pignon de gauche (44 dents) constituant la roue de sortie du

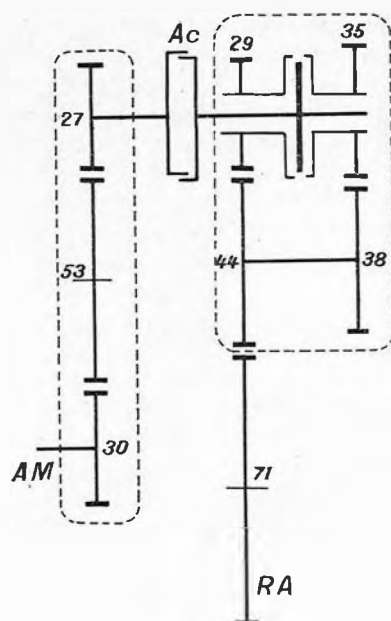


FIG. 17. — Chaîne cinématique de la transmission de l'arbre moteur à la roue d'accouplement.

AM, arbre moteur ; — AC, accouplement élastique ; — RA, roue d'accouplement.

Les traits interrompus schématisent les carters : carter latéral entre l'arbre moteur et l'accouplement élastique ; carter du bloc de changement de rapport de réduction. Les nombres indiquent les dents.

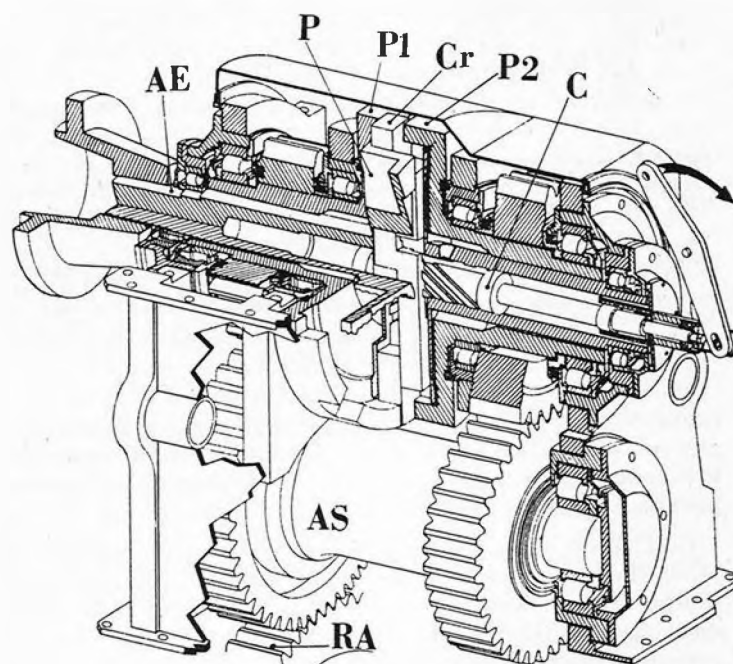


FIG. 18. — Vue perspective du bloc de changement de rapport de réduction.

AE, arbre d'entrée ; — AS, arbre de sortie ; — C, coulisse ; — Cr, crabots ; — P, P₁ et P₂, plateaux d'arbres creux ; — RA, roue d'accouplement.

bloc comme on le voit sur la chaîne cinématique (fig. 17) et la vue perspective du bloc (fig. 18).

Le crabotage du plateau de l'arbre d'entrée sur l'un ou l'autre des plateaux crénelés des arbres creux s'effectue par deux crabots en forme de ligne brisée s'imbriquant l'un dans l'autre (fig. 19) et coulissant dans un logement à l'intérieur du plateau porté par l'arbre d'entrée. Ces crabots sont engagés dans des rainures obliques taillées dans une pièce métaplate C coulissant par guidage cylindrique à l'intérieur de l'arbre d'entrée AE (fig. 18 et 19) et commandée à l'extrémité de cet arbre opposée à celle reliée à l'accouplement élastique.

Par la manœuvre de cette coulisse C, les crabots se déplacent en sens inverse l'un de l'autre et leurs extrémités viennent s'engager dans les encoches de l'un ou l'autre des deux plateaux crénelés d'arbres creux comme on le voit sur la figure 19 ; en position intermédiaire les crabots ne sont engagés dans aucun des deux plateaux d'arbres creux et le bloc est en position de débrayage. La manœuvre de ce dispositif, qui ne peut être effectuée qu'à l'arrêt, s'effectue par une commande pneuma-

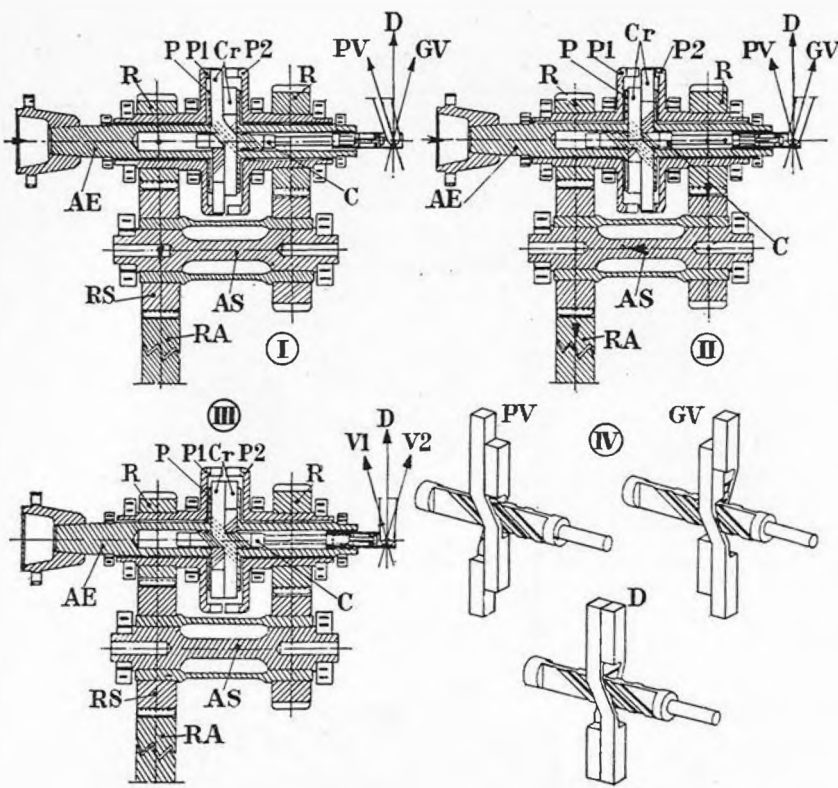


FIG. 19. — Coupes schématiques du bloc de changement de rapport pour la position de petite vitesse (I), de grande vitesse (II) et débrayé (III). Les positions des crabots dans les trois cas sont indiquées en (IV).

AE, arbre d'entrée; — AS, arbre de sortie; — C, coulisse; — Cr, crabots; — P, plateau d'arbre d'entrée; — P1 et P2, plateaux d'arbres creux; — R, roues dentées de commande; — RA, roue d'accouplement; — RS, roue de sortie; — PV : position de petite vitesse. Rapport 1,70. Vitesse maximale de 160 km/h. GV : position de grande vitesse. Rapport 1,22. Vitesse maximale 240 km/h. D : position débrayée.

tique. Au cas où les extrémités des crabots ne se présenteraient pas en face des encoches du plateau d'arbre creux, un vireur à commande manuelle permet de faire tourner l'arbre moteur pour amener les crabots en position correcte.

Ce bloc est à engrenages toujours en prise. En position de petite vitesse, l'arbre d'entrée est craboté sur l'arbre creux de gauche et l'entraînement s'effectue par les roues à 29 et 44 dents; en position de grande vitesse l'arbre d'entrée est craboté sur l'arbre creux de droite et l'entraînement s'effectue par les roues à 35 et 38 dents et la roue à 44 dents qui engrène sur la roue d'accouplement à 71 dents. Le rapport de réduction de l'ensemble de la transmission est de 1,70 pour la petite vitesse et 1,22 pour la grande vitesse.

La position très haute des carters (carter latéral et carter du bloc de changement de rapport de réduction) nécessite leur graissage par électropompes.

Freinage. — L'équipement de freinage est du type à « bloc frein » groupant en une unité le cylindre de frein, le levier amplificateur, le dispositif de rattrapage d'usure et le porteseuille muni d'une semelle en matériau fritté de type Cobra. On supprime ainsi entièrement la timonerie classique et on réalise un gain de poids appréciable.

Le frein est modérable au serrage et au desserrage. Le robinet de mécanicien est du type « presse-bouton » à commande électro-pneumatique, qui permet une grande maniabilité du freinage et une adaptation très simple au freinage électro-pneumatique.

Le débit du groupe moto-compresseur est de 2 200 l/mn.

Le sablage est à commande par électro-valve. Le sable est dirigé sous les roues à l'aide de sableurs aspirants à débit limité et à grande vitesse d'éjection. Les bacs à sable sont logés dans la caisse.

La conception de la partie électrique de la locomotive est celle d'un engin à courant continu bitension (1,5 et 3 kV), alimenté par un groupe transformateur redresseur dans le cas des marches sous caténaire alimentée en courant monophasé 16 2/3 ou 50 Hz. Le schéma de base est donc celui de la figure 6.

La formule du bogie monomoteur, outre ses avantages au point de vue de la tenue de voie et du poids, offrait dans le cas présent celui de la réalisation facile d'un moteur à double induit (moteur « tandem ») fonctionnant sous tension de 1,5 kV par couplage en parallèle et sous tension de 3 kV par couplage en série sans le risque de patinage des moteurs individuels couplés en série, puisque les deux éléments de chaque moteur tandem sont, par construction, en liaison mécanique rigide.

Le schéma qui découle de cette conception est donné par la figure 20.

Nous décrirons successivement les moteurs de traction, le transformateur, le redresseur de traction, les selfs de lissage, l'appareillage de traction, les pantographes et l'équipement de toiture, les auxiliaires et leur alimentation.

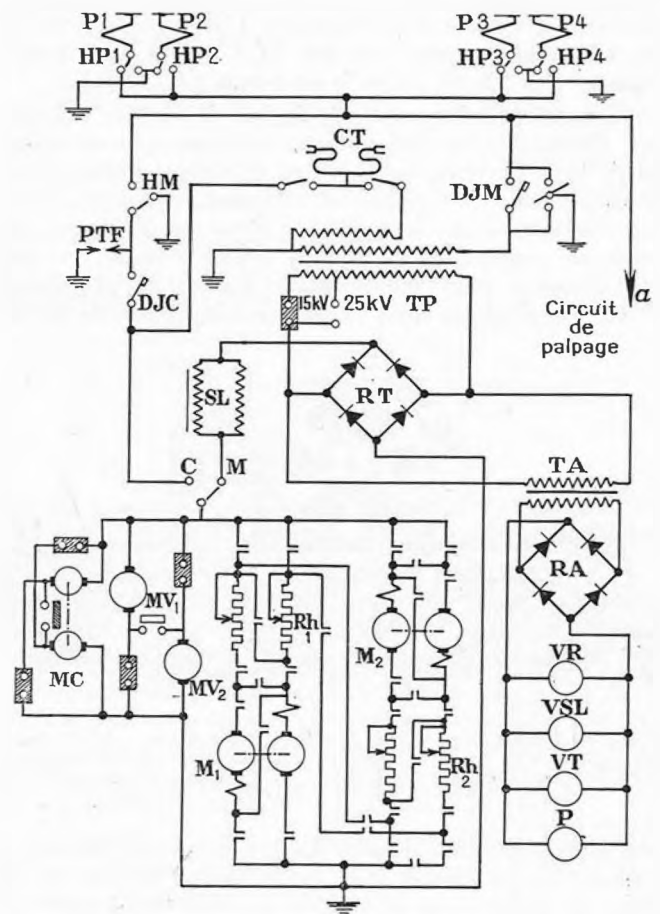


FIG. 20. — Schéma de principe de la partie électrique des locomotives quadricourant CC 40 100.

CT, chauffage train; — DJC, disjoncteur courant continu; DJM, disjoncteur courant monophasé; — HM, sectionneur de mise à la masse du disjoncteur à courant continu; — HP1 à 4, sectionneurs de pantographes avec position de mise à la masse; — M1 et M2, moteurs de traction à double induit; — MC, groupe compresseur à moteur à double induit de l'équipement de freinage; — MV1 et MV2, moteurs d'entraînement des ventilateurs des moteurs de traction; — P, moteur d'entraînement de la pompe de mise en circulation d'huile de refroidissement du transformateur (locomotives 40105 à 10), moteur du groupe moteur-alternateur pour l'alimentation du moteur triphasé asynchrone d'entraînement de la pompe de mise en circulation de l'hexafluorure de soufre de refroidissement du transformateur; — P1, pantographe 25 kV, 50 Hz S.N.C.F. et C.F.L. 3 kV F.S.; — P2, pantographe 1,5 kV S.N.C.F. et N.S. 3 kV S.N.C.B. et C.F.L.; P3, pantographe 15 kV, 16 2/3 Hz C.F.F.; — P4, pantographe 15 kV, 16 2/3 Hz D.B. et O.B.B.; — PTF, parafoudre; — RA, redresseur semi-conducteur d'alimentation des auxiliaires; — RT, redresseur semi-conducteur d'alimentation des moteurs de traction; — SL, selfs de lissage; — TA, transformateur des auxiliaires; — TP, transformateur principal; — VR, groupe monoventilateur de refroidissement du redresseur des moteurs de traction; — VSL, groupe moto-ventilateurs de refroidissement des selfs de lissage; — VT, groupe moto-ventilateur de l'aéroréfrigérant du circuit de refroidissement du transformateur; — a, vers le circuit de palpage.

Moteurs de traction. — Le moteur à double induit TDQ 657 de la Société Alstom à excitation série, hexapolaire non compensé, a été particulièrement étudié pour l'alimentation en courant ondulé provenant du redressement du courant monophasé 16 2/3 ou 50 Hz avec interposition d'une self de lissage abaissant le taux d'ondulation à 30 %.

Les deux collecteurs sont disposés dans la partie centrale afin d'améliorer la répartition de la ventilation. L'ensemble du moteur est isolé pour la tension de 3 kV et suivant la technique adoptée pour tous les moteurs équipant les récents types de locomotives de la S.N.C.F., les isolants sont de classe H à base de silicones autorisant des températures de fonctionnement de 180 °C pour les inducteurs et de 160 °C pour les induits. Les pôles principaux sont shuntés en permanence au taux de 12 %.

Les caractéristiques de fonctionnement en régime continu et en régime unihoraire pour un seul élément de moteur double (un induit et un inducteur) sous la tension nominale de 1,5 kV sont les suivantes :

	Intensité (A)	Puissance (kW)
Régime continu	660	918
Régime unihoraire	690	965

L'air de refroidissement, insufflé dans la partie centrale au droit des collecteurs, est réparti entre les deux induits et inducteurs, et évacué à travers les ouvertures grillagées des flasques.

Une des particularités de ces moteurs est que leurs pôles principaux portent des bobines sondes aux bornes desquelles apparaît une tension alternative dont la fréquence est celle du passage des dents du fer de l'induit, laquelle est proportionnelle à la vitesse du moteur. Cette tension est appliquée à un système électronique qui convertit les fréquences en des tensions continues proportionnelles. La comparaison des tensions délivrées par chacun des moteurs doubles permet ainsi de déceler les patinages. Ces tensions permettent aussi d'assurer très simplement la protection des moteurs contre les survitesses.

Transformateur. — Ainsi que nous l'avons précédemment indiqué, le poids du fer d'un transformateur à fréquence 16 2/3 Hz est environ double de celui d'un transformateur à fréquence 50 Hz de même puissance. Ce supplément de poids par rapport à une locomotive tricourant (continu 1,5 et 3 kV-monophasé 25 kV-50 Hz) complique l'étude de la locomotive car les charges par essieu sont rigoureusement fixées.

La conception de la locomotive quadricourant dérivée d'une locomotive à courant continu alimenté à tension fixe par un groupe transformateur-redresseur est avantageuse au point de vue du poids car on évite ainsi le poids de l'appareillage nécessaire pour l'alimentation à tension variable (graduateur sur la haute tension ou prises sur le secondaire), les rhéostats étant toujours nécessaires pour les marches en courant continu 1,5 ou 3 kV.

Le gain de poids ainsi réalisé étant insuffisant, on a cherché à alléger la construction du transformateur en substituant à l'huile couramment utilisée une atmosphère d'hexafluorure de soufre (SF₆), en circulation forcée, qui, sous une pression d'environ 3 bars, présente une rigidité diélectrique égale à celle de l'huile. La masse spécifique élevée de ce gaz (5 fois celle de l'air) assure de bons échanges de chaleur, malgré une chaleur spécifique légèrement inférieure à celle de l'air. En outre la stabilité de ce gaz permet d'admettre des températures de fonctionnement plus élevées des enroulements, en adoptant la classe H on peut ainsi gagner sur le poids de cuivre. Malheureusement ces avantages sont en partie compensés par l'augmentation de poids résultant de la nécessité de prévoir une cuve de transformateur résistant à la pression de 3 bars et aussi par l'accroissement du poids des auxiliaires (aérofrigorant, groupe moto-pompe à gaz, groupe moto-ventilateur de l'aérofrigorant) correspondant à la nécessité d'un refroidissement plus intense. Finalement on est parvenu à une masse de 10,95 t pour une puissance de 5 150 kVA. Le gain sur un transfor-

mateur à huile étant ainsi négligeable, les 6 nouvelles locomotives (CC 40 105 à 10) seront équipées d'un transformateur à bain d'huile.

Le circuit magnétique, en tôles à cristaux orientés, est du type cuirassé avec une colonne principale centrale et deux colonnes de retour de flux ; les trois colonnes sont réunies à leurs extrémités par des culasses. Comme le montre le schéma général (fig. 17), le transformateur comporte trois enroulements :

— enroulement primaire alimenté sous 15 kV - 16 2/3 Hz ou 25 kV - 50 Hz ;

— enroulement secondaire traction avec ses deux sorties commutables permettant d'obtenir à vide, une tension de 2 144 V pour une tension à la caténaire de 15 kV - 16 2/3 Hz ou 25 kV - 50 Hz. La réactance de ce secondaire est dans tous les cas d'environ 15 % ;

— enroulement de chauffage du train délivrant une tension de 1 500 V sous caténaire 25 kV - 50 Hz et une tension de 1 000 V sous caténaire 15 kV - 16 2/3 Hz.

Redresseur de traction. — Les deux moteurs sont alimentés par un seul redresseur au silicium en pont de Graetz dont chaque branche est constituée de 84 diodes (6 série, 14 parallèle), soit au total 336 diodes.

La protection des diodes contre les surtensions et la répartition des tensions entre les diodes est assurée par résistances-capacités et résistances suivant les schémas usuels.

Le nombre de diodes et leurs caractéristiques, 2 kV crête en tension inverse et intensité moyenne de 200 A à 150 °C, ont permis de limiter la protection du redresseur au simple déclenchement du disjoncteur monophasé par un relais de surcharge alimenté par un transformateur d'intensité inséré entre le transformateur principal et le redresseur. On notera que la marge de sécurité sur la tension, soit 5, est imposée par les surtensions très dures dans une machine à rapport fixe de transformation et résulte de l'expérience.

Les 336 diodes qui constituent le redresseur sont rassemblées en un bloc parallélépipédique à base carrée dont le volume ne dépasse que légèrement 1,5 m³ et dont chaque face verticale porte les diodes d'une branche de pont. La ventilation est assurée par un groupe moto-ventilateur monté au centre du bloc à la partie inférieure et aspirant l'air à travers l'ensemble des diodes et le refoulant à la partie inférieure de la caisse. Les diodes sont très aisément accessibles, ainsi que le groupe moto-ventilateur.

Selfs de lissage. — Les ondulations du courant redressé sont atténuées par deux selfs de lissage connectées en parallèle. Ces selfs à noyau droit sont disposées côte à côte et sont ventilées par un groupe moto-ventilateur alimenté par le groupe transformateur-redresseur des auxiliaires.

Pantographes et équipement de toiture. — Les locomotives sont équipées de quatre pantographes monobranche AM 18 implantés sur la toiture suivant la disposition représentée sur la figure 6 et dont les caractéristiques et réseaux d'utilisation sont les suivants :

Type d'archet :	Unipalette	Unipalette	Unipalette	Bipalette
Largeur (m) :	1.320	1.450	1.950	1.950
Réseau :	C.F.F.	S.N.C.F. (25 kV)	DB	SNCF
		F.S.	O.B.B.	NS
		C.F.L.		SNCF (1,5 kV)

Les réseaux sont indiqués suivant la symbolisation de l'Union Internationale des Chemins de fer :

- C.F.F. Chemins de fer Fédéraux Suisses.
- C.F.L. Chemins de fer Luxembourgeois.
- D.B. Chemin de fer Fédéral Allemand.
- S.N.C.F. Société Nationale des Chemins de fer Français.
- F.S. Chemin de fer Italien de l'Etat.
- N.S. Chemins de fer Néerlandais.
- O.B.B. Chemins de fer Fédéraux Autrichiens.
- S.N.C.B. Société Nationale des Chemins de fer Belges.

Les cylindres de ces pantographes sont pourvus d'une butée spéciale à commande pneumatique limitant automatiquement à

5,90 m la hauteur de développement au-dessus du rail, pour les circulations sur les lignes du réseau néerlandais.

Le schéma général (fig. 20) montre que chaque pantographe est connecté à la ligne de toiture par un sectionneur avec position de mise à la masse. Un commutateur de séparation avec position de mise à la masse évite d'appliquer les tensions 15 et 25 kV sur la traversée de toiture courant continu et le disjoncteur courant continu dont l'isolement correspond à la tension de service 3 kV.

Les quatre systèmes d'alimentation et les quatre pantographes ont conduit, dans le but d'éviter les fausses manœuvres et de simplifier le plus possible la tâche du conducteur, à conjuguer la commande de levée des pantographes à celle du commutateur commandant les contacteurs assurant les couplages correspondant aux quatre systèmes d'alimentation. Ce commutateur, dénommé « sélecteur d'administration » comporte les sept positions suivantes correspondant aux administrations ferroviaires des réseaux sur lesquelles la locomotive peut circuler :

C.F.L.-S.N.C.F. 25 kV.	F.S. 3 kV.
D.B.-O.B.B. 15 kV.	N.S. 1,5 kV.
C.F.F. 15 kV.	S.N.C.F. 1,5 kV.
C.F.L.-S.N.C.B. 3 kV.	

La symbolisation des réseaux est celle de l'Union Internationale des Chemins de fer, qui est rappelée ci-dessus.

Ainsi, le commutateur des systèmes d'alimentation (« sélecteur d'administration ») ne peut être manœuvré qu'en position tous pantographes abaissés et seul le pantographe correspondant au système d'alimentation affiché sur le sélecteur peut être levé.

A cet effet, les deux commandes s'effectuent par une seule manette qui est établie de telle sorte qu'elle ne peut être enlevée de la commande des pantographes que dans la position tous pantographes abaissés.

Dans ces conditions, le seul risque d'erreur est dans le choix de la position du sélecteur et ne peut résulter que d'une faute du conducteur par inattention. Une telle erreur pouvant donner lieu à des conséquences très dommageables, il était nécessaire de prévoir des protections interdisant la fermeture du disjoncteur si la position du sélecteur d'administration ne correspond pas à la nature du courant à la caténaire et si tous les couplages correspondant à cette position ne sont pas réalisés.

Ces protections sont réalisées par un circuit dit « circuit de palpage » dont le schéma de principe est représenté sur la figure 21 et qui se compose essentiellement d'un transformateur T_p dont le primaire est en série avec une résistance R_p

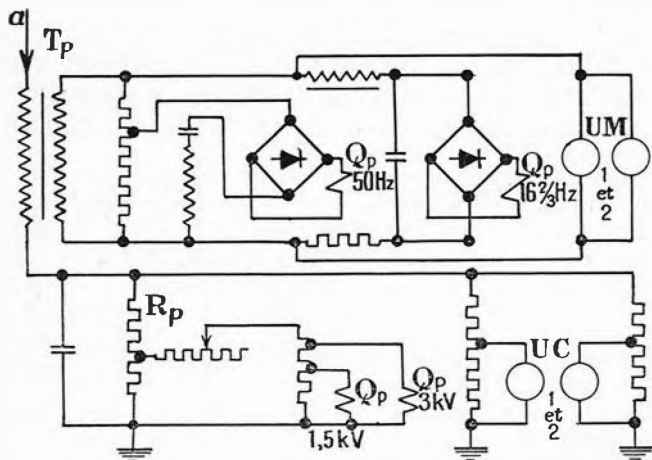


FIG. 21. — Circuit de palpage des locomotives CC 40 100.

Q_p 50 Hz et Q_p 16 2/3 Hz relais de commande pour les marches en courant monophasé, Q_p 1,5 kV et Q_p 3 kV relais de commande pour les marches en courant continu ; — R_p , résistance de palpage ; — T_p , transformateur de palpage ; — UM 1 et 2, voltmètres de cabine pour courant monophasé ; — UC 1 et 2, voltmètres de cabine pour courant continu ; — a, connexion à la ligne de toiture (voir fig. 20).

de valeur telle que son enroulement primaire puisse être parcouru en permanence par le courant continu qui s'établit lorsque le circuit est sous tension continue de 3 kV. Le secondaire de ce transformateur débite sur deux circuits résonnants accordés, l'un sur la fréquence 16 2/3 Hz, l'autre sur la fréquence 50 Hz et alimentant chacun un relais Q_p par l'intermédiaire d'un pont de redresseurs semi-conducteurs. L'excitation d'un de ces relais autorise la réalisation des couplages correspondants présélectionnés par le sélecteur d'administration, si la position de ce sélecteur est correcte, et finalement la fermeture du disjoncteur monophasé. Tout risque de fausse manœuvre est ainsi évité. Le secondaire alimente aussi les deux voltmètres de cabine UM 1 et UM 2 qui indiquent, pour les marches en courant monophasé, la tension à la caténaire.

L'examen du schéma montre qu'aucun des relais ne correspondant à la nature et à la fréquence du courant à la caténaire ne peut-être excité.

Dans les cas de fonctionnement en courant continu, les deux relais 1,5 et 3 kV sont alimentés par prise sur la résistance R_p et ils autorisent la réalisation des couplages dans les mêmes conditions que les relais pour courant monophasé et finalement la fermeture du disjoncteur continu.

Appareillage de traction. — L'appareillage de traction comporte : d'une part, l'ensemble de l'appareillage d'une locomotive à courant continu de type BB (disjoncteur général, résistances de démarrage, résistances de shuntage des inducteurs, contacteurs de ligne, contacteurs d'élimination des résistances de démarrage, contacteurs de couplage série-parallèle, inverseurs de sens de marche, contacteurs de shuntage des inducteurs), les deux moteurs doubles étant, au point de vue schéma, équivalents aux quatre moteurs d'une telle locomotive ; — d'autre part, l'ensemble des contacteurs assurant les commutations pour le passage d'un système de traction à un autre système, tant pour les circuits de puissance que pour les auxiliaires. L'ensemble de ces appareils est rassemblé en un seul bloc, dénommé bloc traction, réalisé par Jeumont-Schneider, entièrement monté et câblé en atelier, et introduit dans la locomotive par la toiture comme le transformateur principal. Cette technique, appliquée pour la première fois sur les prototypes BB 9003 et 4 de la S.N.C.F., est maintenant devenue usuelle.

Les contacteurs sont commandés par deux arbres à cames suivant le système Jeumont-Heidmann. L'un de ces arbres à cames (JH 1) commande les contacteurs de ligne, de couplage série-parallèle des moteurs doubles et d'élimination des résistances de démarrage. L'autre arbre à cames commande les contacteurs réalisant les commutations des circuits de puissance pour les marches sous les divers systèmes d'alimentation et aussi pour la marche en freinage rhéostatique.

Les protections contre les surcharges sont assurées par des relais de surcharge provoquant le déclenchement du disjoncteur courant continu ou du disjoncteur courant monophasé suivant le système d'alimentation. Le disjoncteur courant continu est du type JRT 55 E 3000. Le disjoncteur courant monophasé est du type DBTF à air comprimé d'un pouvoir de coupure de 200 MVA qui équipe toutes les locomotives à courant monophasé de la S.N.C.F.

Auxiliaires. — La conception d'un engin polycourant comme un engin courant continu dont l'équipement est alimenté sous tension fixe par un groupe transformateur-redresseur conduit naturellement à alimenter les auxiliaires généraux (ventilation des moteurs de traction, équipement de freinage, ventilation des résistances de démarrage et éventuellement de freinage rhéostatique) dans les mêmes conditions que sur un engin à courant continu. Les auxiliaires spéciaux à la marche en courant monophasé étant au contraire alimentés à partir du secondaire du transformateur par des circuits qui leur sont particuliers.

La locomotive étant bitension en courant continu 1,5 et 3 kV, les dispositions suivantes ont été adoptées pour les auxiliaires généraux.

La ventilation des moteurs de traction est assurée pour chacun des moteurs doubles par un ventilateur entraîné par un moteur à courant continu fonctionnant sous 1,5 kV. Les deux moteurs sont alimentés directement en parallèle dans les cas où l'engin est alimenté sous tension de 1,5 kV et sont couplés en série dans le cas où l'alimentation s'effectue sous tension de 3 kV.

Le compresseur de l'équipement de freinage est entraîné par un moteur double dont les induits et inducteurs sont couplés en série dans les cas d'alimentation sous 3 kV et en parallèle dans les cas d'alimentation sous 1,5 kV.

La ventilation des résistances de démarrage est assurée par un groupe de ventilateurs dont les moteurs sont alimentés par prise en dérivation aux bornes du dernier élément des résistances de démarrage (talon de rhéostat). Par cette disposition, adoptée pour la première fois sur les locomotives prototypes BB 9003 et 4 de la S.N.C.F. ⁽¹⁾ et appliquée depuis sur de nombreux types de locomotives, on obtient d'une manière extrêmement simple et d'un fonctionnement très sûr la ventilation et son autorégulation à la quantité de chaleur dégagée dans le rhéostat. En outre, par ce mode d'alimentation des moteurs des ventilateurs, leur fonctionnement est assuré dans les mêmes conditions quelle que soit l'alimentation à la caténaire.

Les auxiliaires spéciaux à la marche en courant monophasé, groupes moto-ventilateurs de refroidissement du redresseur, des selfs de lissage et de l'aéroréfrigérant du transformateur, groupe moto-pompe de circulation du fluide de refroidissement du transformateur principal sont entraînés par des moteurs à courant continu alimentés, sous la tension de 135 V, par un groupe transformateur-redresseur, lui-même alimenté par le secondaire du transformateur de traction. Ainsi que nous l'avons indiqué précédemment, les transformateurs principaux des quatre premières locomotives sont refroidis à l'hexafluorure de soufre, ce qui a conduit à adopter un groupe moto-pompe étanche de mise en circulation avec moteur asynchrone 380 V - 100 Hz qui est alimenté par un petit groupe moteur à courant continu 135 V — alternateur triphasé 380 V - 100 Hz.

Freinage rhéostatique. — Les locomotives sont équipées du freinage rhéostatique pouvant être commandé soit à volonté sous la dépendance du conducteur, soit automatiquement en conjugaison avec le frein pneumatique.

Les moteurs élémentaires de chaque moteur double sont couplés en parallèle et les deux moteurs doubles débitent en série sur l'ensemble des résistances de démarrage ; l'excitation série a été maintenue pour le fonctionnement en génératrice afin de limiter le plus possible l'équipement spécial au freinage.

Le nombre des crans de freinage est de seize et le passage peut se faire à volonté, soit uniquement sous l'action d'un relais d'intensité (relais de décélération) soit par impulsions, le passage des crans restant dans tous les cas subordonné au contrôle du relais. La commande du freinage électrique de la locomotive est conjuguée avec celle du freinage pneumatique de la rame.

Aménagement des cabines de conduite. — L'étude des cabines de conduite a fait l'objet d'une attention toute particulière qui se traduit même sur l'aspect extérieur inhabituel des extrémités que nous avons signalé au cours de la description de la caisse et dont l'objet est de supprimer la réflexion des appareils du pupitre dans les glaces frontales, par l'inclinaison vers l'avant de leur partie supérieure. Ces glaces sont chauffantes et munies d'écrans pare-soleil et d'essuie-glace à commande pneumatique. La recherche de l'isolement thermique a conduit à prévoir un double plafond avec interposition de laine de verre.

Le pupitre, du type « fonctionnel », rassemble tous les appareils de commande et de contrôle électriques et pneumatiques

concernant la conduite. Prévu pour la conduite en position assise, il permet cependant une conduite aisée en position debout.

Le chauffage est assuré pour chaque cabine par un aérotherme soufflant de l'air chaud dans une gaine dont la forme et la disposition assurent une bonne répartition de l'air chaud dans l'ensemble de la cabine.

Les cabines sont équipées des appareils de sécurité imposés par les règlements des divers réseaux sur lesquels les locomotives sont appelées à circuler, c'est-à-dire :

— Dispositif de veille automatique liée à la répétition des signaux fermés.

— Dispositif d'enregistrement automatique des signaux avec brosse de contact pour la circulation sur les lignes de la S.N.C.F. et la S.N.C.B.

— Système Indusi par capteurs magnétiques, pour la circulation sur les lignes du Chemin de fer Fédéral Allemand.

— Système Integra par capteurs magnétiques pour la circulation sur les lignes des Chemins de fer Fédéraux Suisses.

Les feux (3 feux blancs et 2 feux rouges) et l'avertisseur à deux tonalités sont conformes aux règles de l'Union Internationale des Chemins de fer.

En plus de leur utilisation comme engins polycourant pour les relations internationales rapides, ces locomotives ont permis d'acquérir la connaissance du comportement en exploitation des bogies monomoteurs bi-réduction à trois essieux (bogies C) qui se révèlent nécessaires pour les locomotives devant assurer la traction des trains de voyageurs aux vitesses de l'ordre de 200 km/h.

Pour réaliser un tel programme de traction, il faut disposer d'une puissance en régime continu de plus de 5 000 kW et, par conséquent, en effet, passer de la locomotive à 4 essieux (BB) à la locomotive à 6 essieux (CC). C'est ainsi qu'en partant des éléments mécaniques des locomotives CC 40 100, ont été étudiées les futures locomotives bi-courant CC 21 000 (continu 1,5 kV, monophasé 25 kV-50 Hz) de la S.N.C.F., dont deux prototypes sont en construction ; leurs caractéristiques imposées sont les suivantes.

Vitesse maximale : réduction voyageurs 220 km/h.
réduction marchandises, 100 km/h.

Puissance en régime continu : kW 5 520.

Vitesse au régime continu : réduction voyageurs 135 km/h.
réduction marchandises, 62 km/h.

Masse totale en ordre de marche : 119 t.

Ces caractéristiques permettront :

— sur la réduction voyageurs, la traction de trains de 350 t à la vitesse de 220 km/h en rampe de 5 ‰, ou de trains de 800 t à la vitesse de 160 km/h également en rampe de 5 ‰.

— sur la réduction marchandises, la traction de trains de 3 600 t en rampes de 5 ‰, de 2 470 t en rampe de 8 ‰ et de 2 080 t en rampe de 10 ‰.

Des versions mono-courant de ces locomotives sont prévues pour le courant continu 1,5 kV (série CC 6 500) dont 41 sont en construction et éventuellement pour le courant monophasé 25 kV-50 Hz (série 14 500).

**

Dans le prochain numéro, nous décrirons les locomotives quadricourant de la série BB 160 de la Société Nationale des Chemins de fer Belges, puis les locomotives BB de la série E 410 du Chemin de fer Fédéral Allemand.

Y. MACHEFERT-TASSIN.