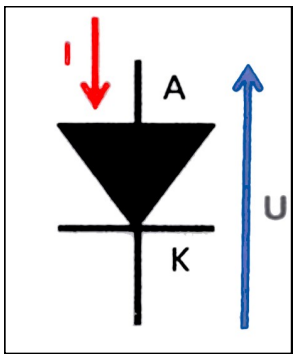
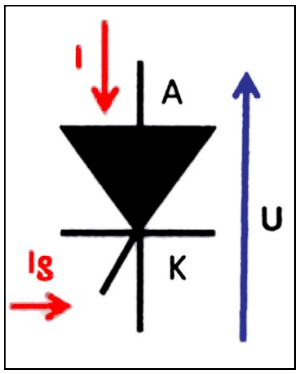
CIRCUITS DE PUISSANCE TRACTION

Avant de décrire les circuits de puissance traction, il est bon de faire quelques rappels d'électricité élémentaire.

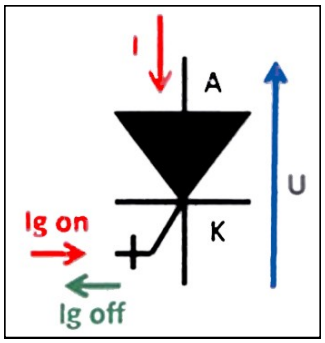
Il a fallu attendre 1971 avec l'arrivée des BB 15000 et 1976 avec l'arrivée au premier trimestre des BB 7200 et en fin d'année des BB 22200 pour que l'électromécanique laisse sa place à l'électronique de puissance.
C'est dans les années 1960 que les semi-conducteurs de puissance apparurent sur le marché. Un développement progressif commença par des performances améliorées à chaque génération.



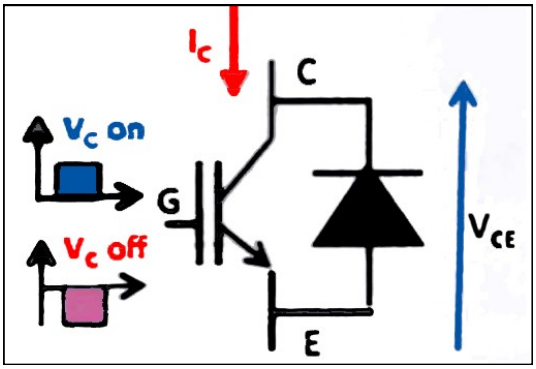
-La diode autour de 1960, un élément non réglable, une sorte de valve électrique qui ne laisse passer le courant que dans un sens. La diode conduit dès que la tension anode/cathode est positive. Elle se bloque si la tension s'inverse.



-Le thyristor, vers 1970, un interrupteur statique qui peut être activé pour agir comme une diode, cependant, une fois activé, il ne peut être remis à l'état bloqué que par annulation du courant qui le traverse et si cette tension s'inverse. Fermeture commandée en courant.



-Le **GTO** (**G**ate **T**urn-**O**ff Thyristor), après 1980, un thyristor qui se met en conduction sur un ordre d'allumage. Il se bloque sur un ordre d'extinction. Fermeture/ouverture commandées en courant.



-L'**IGBT** (**I**nsulated **G**ate **B**ipolar **T**ransistor), après 1990, interrupteur à plus faibles pertes, commandé en conduction par un signal de tension positive sur sa grille. Il est commandé au blocage sur un signal en tension négative sur sa grille. Conduction et blocage commandés en tension. Avec ces semi-conducteurs de base il est possible de concevoir des circuits de traction adaptés à tous les besoins.

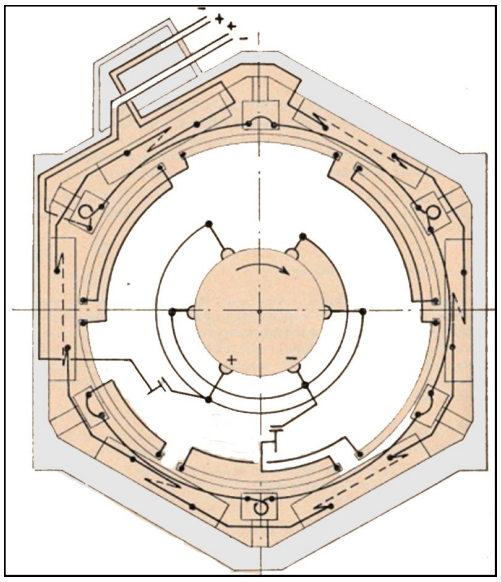
-**L'IGCT** (**I**nsulated **G**ate **C**ontrolled **T**hyristor) est un nouveau composant qui fait partie des projets actuels dans le domaine de la recherche. La miniaturisation continue tout en améliorant les performances.

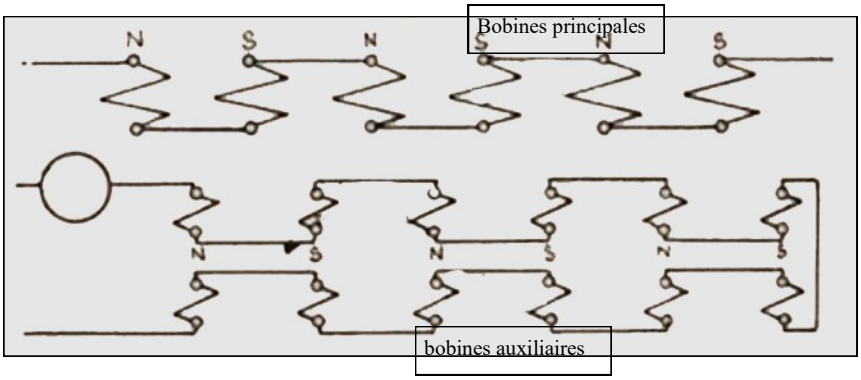
Nous traiterons d'abord les locomotives à courant continu (1500 V), puis les locomotives à courant monophasé (25000 V) ainsi que les TGV.

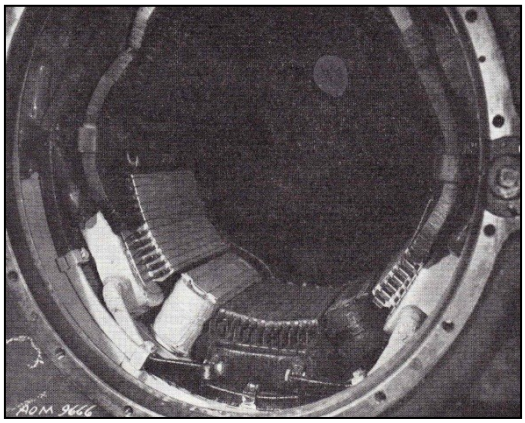
LOCOMOTIVES Á COURANT CONTINU :

Le moteur :

Le moteur le plus utilisé était le moteur série-continu. C'était le moteur continu le plus apte à la traction ferroviaire du fait de son fort couple au démarrage. Un moteur d'une BB 7200/15000/22200 développe 2200 KW.

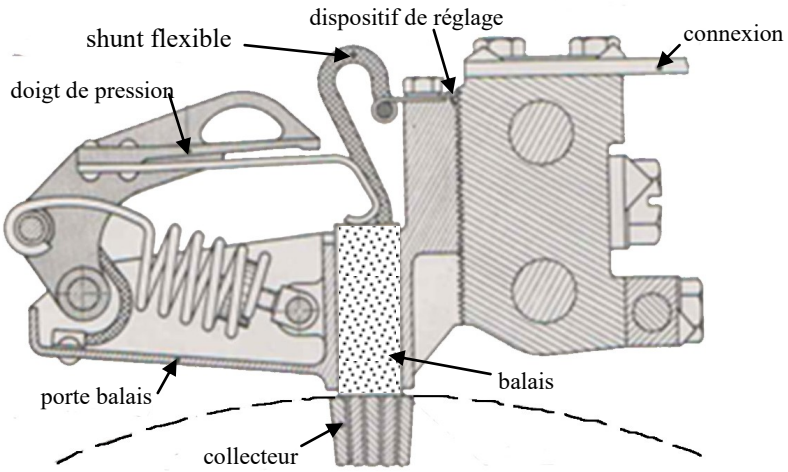






Inducteur moteur BB 8100

Le moteur comprend un induit (la partie tournante) composé de barres de cuivre, logées dans un cylindre nommé tambour, reliées à un « collecteur rotatif » inversant la « polarité » de chaque enroulement rotorique au moins une fois par tour de façon à faire circuler un flux magnétique transversal en quadrature avec le flux statorique. Les enroulements rotoriques sont aussi appelés enroulements d'induits, ou communément « induit » en référence au fonctionnement en génératrice de cette machine. Le courant arrive par des balais montés sur des porte-balais. Tous les balais sont solidaires d'une couronne mobile qui peut être tournée, après retrait des connexions et déblocage d'un verrou, pour effectuer la visite des différentes des lignes de balais.



La partie statique du moteur où inducteur qui est à l'origine de la circulation d'un flux magnétique longitudinal fixe créé par des enroulements statoriques (bobinage). L'inducteur comprend différents enroulements :

Les ***pôles inducteurs principaux*** toujours en nombre pairs (Nord et Sud alternés).

Les ***pôles auxiliaires*** sont disposés de manière à créer, par induction magnétique, dans les sections d'induit commutées, des forces électromotrices opposées aux forces électromotrices parasites de commutation. Ils agissent en sens inverse de la cause qui favorise les étincelles et contribuent par conséquent à éliminer ces dernières. Les pôles auxiliaires sont branchés en série avec l'induit.

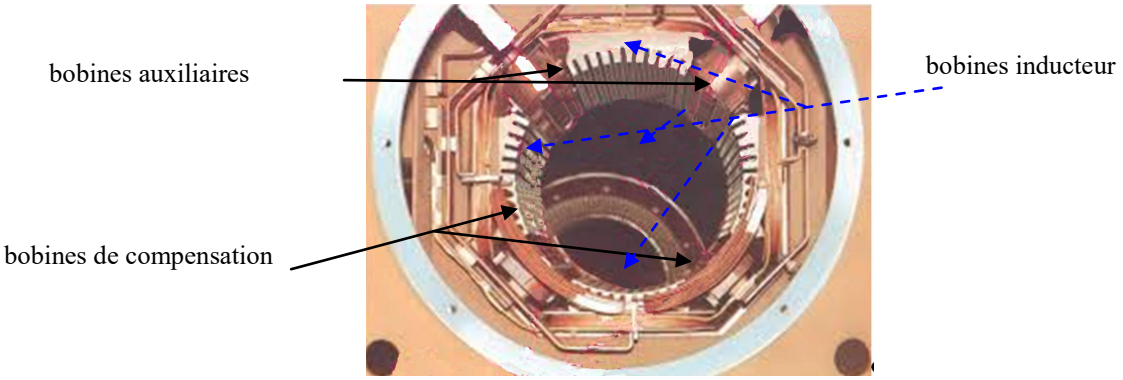
Les ***enroulements de compensation*** ont un rôle tout différent. Ils sont constitués par des barres de cuivre logées dans des encoches pratiquées à l'intérieur des pôles inducteurs principaux, parallèlement à l'axe de l'induit.

L'induit du moteur est une masse de fer doux entourée de conducteurs parcourus par des courants. Il se crée donc un champ magnétique nommé « champ de réaction d'induit ». Ce phénomène est nuisible, il a pour effet :

-De perturber l'égale répartition des différences de potentiel entre lames consécutives du collecteur.

-D'affaiblir le champ magnétique des pôles principaux.

Le premier effet est le plus important, il crée un danger de production d'arcs entre les lames du collecteurs. Particulièrement en période de shuntage des inducteurs du moteur, lorsque le champ de réaction d'induit prend une importance accrue par rapport au champ inducteur diminué. C'est le risque de flash.



Le rhéostat :

Un moteur de traction d'une locomotive a une résistance électrique (ohm Ω) très faible, moins d'un ohm. Pour éviter une montée brutale de l'intensité lorsque le moteur est arrêté et au démarrage il est nécessaire de limiter cette intensité en incorporant des résistances dans le circuit traction. Pour limiter le nombre de résistances, donc le poids et les pertes par effet Joule, on modifie aussi le couplage des moteurs entre eux. Une ventilation forcée est assurée par des ventilateurs.

Effet Joule :

L'**effet Joule** est la manifestation thermique de la résistance électrique. Il se produit lors du passage d'un courant électrique dans tous matériaux conducteurs, à l'exception des supraconducteurs qui nécessitent cependant des conditions particulières. L'**effet Joule** est responsable de pertes d'énergie, c'est à dire de la conversion indésirable, mais inévitable d'une partie de « l'énergie électrique » en énergie thermique.

L'effet porte le nom du « physicien » anglais James Prescott Joule qui l'a étudié vers 1860.

Les élévations de température, et par conséquent les quantités de chaleur dégagées, sont proportionnelles aux carrés des intensités des courants.

L'expression algébrique de la loi de Joule est :

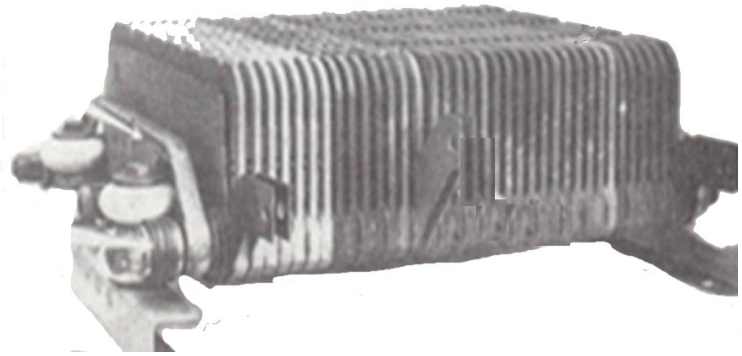
- "**Q**" = $0.24RI^2t$,
- "**Q**" = quantité de calories,
- "**R**" la résistance du matériau en ohm (Ω),
- "**I**" l'intensité,

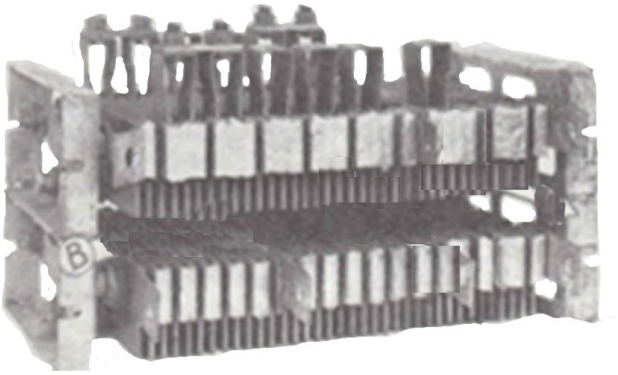
- “**t**“ le temps en secondes.

Prenons deux exemples chiffrés en faisant varier l’intensité (500 et 1000 A) dans un même circuit et dans un même temps :
1 : R = 10 Ω I = 500 A t = 30’’
Cela donne : Q = 0.24 × 10 × (500 × 500) × 30 = 18 000 000 calories.
2 : R = 10 Ω I = 1000 A t = 30’’
Cela donne : Q = 0.24 × 10 × (1000 × 1000) × 30 = 72 000 000 calories.
Toutes ces calories sont de la chaleur dissipée.

On comprend bien pourquoi dans les documents techniques de conduite des locomotives on demande à ce que le rhéostat soit éliminé le plus rapidement possible.

Le rhéostat est composé de bancs de résistances de démarrage. Ils sont constitués de grilles en fonte ou en tôle serrées les unes contre les autres avec interposition de rondelles isolantes ou de rondelles en cuivre selon les jonctions à réaliser : mise en série, mise en parallèle. Des pièces de connexion, en nombre variable, sont interposées entre les grilles en vue d’effectuer les liaisons convenables avec le câblage de la locomotive.





Les contacteurs de démarrage sont reliés aux extrémités des résistances de manières à permettre une élimination progressive du rhéostat par court-circuitage ou association en différents branchements.

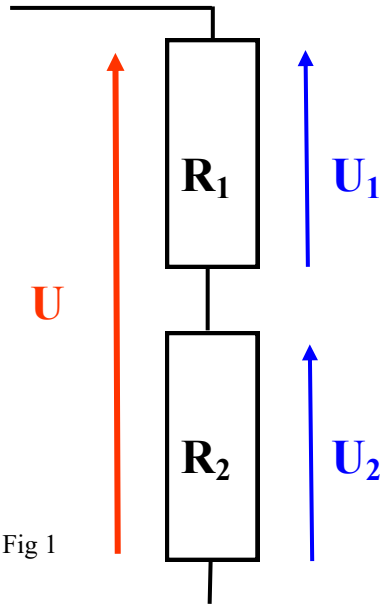


Fig 1

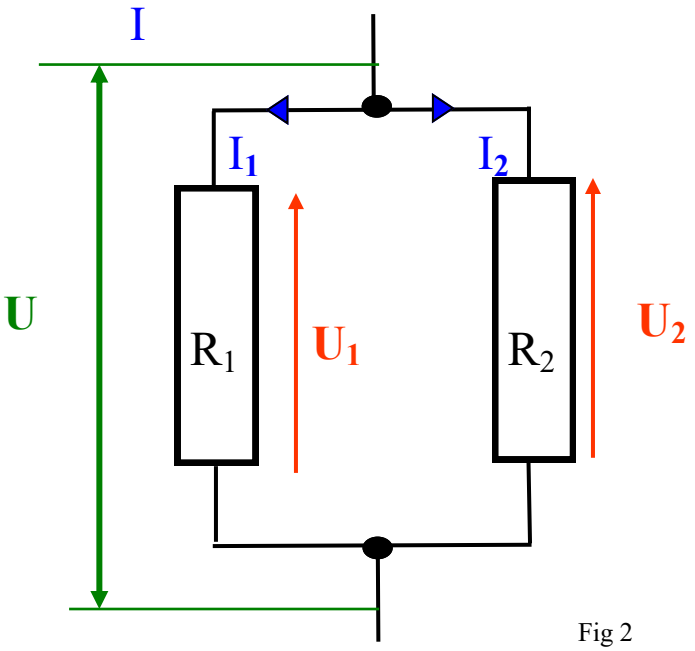


Fig 2

1) -Montage en série **2) - Montage en parallèle**

Montage série : la résistance équivalente est la somme des résistances.

Dans le cas de la figure 1 ci-dessus :

R = R1 + R2

U = U1 + U2

Si l'on veut chiffrer en donnant une valeur aux différents éléments, cela donnerait par exemple :

U = 1500 V, **R1** = 10 Ω, **R2** = 20 Ω

Nous savons que U = RI, que $I = \frac{U}{R}$ et que $R = \frac{U}{I}$

R = 10 + 20 = 30 Ω

$\mathbf{I} = \frac{1500}{30} = 50$ A

$\mathbf{U1} = \overset{\Omega}{10} \times \overset{I}{50} = 500$ V $\qquad$ $\mathbf{U2} = \overset{\Omega}{20} \times \overset{I}{50} = 1000$ V

U égale bien 500 + 1000 = 1500 V

Montage parallèle : l'inverse de la résistance équivalente est la somme des inverses des résistances dérivées.

Dans le cas de la figure 2 ci-dessus :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2}$$

U = **U1** = **U2**

Si l'on veut chiffrer avec les mêmes valeurs que ci-dessus cela donnerait :

U = **U1** = **U2** = 1500 V

Quant à la résistance équivalente :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{10} + \frac{1}{20} = \frac{2}{20} + \frac{1}{20} = \frac{3}{20} = 6{,}66\ \Omega$$

Soit $\mathbf{I} = \frac{1500}{6{,}66} = 225$A

$\mathbf{I_1} = \frac{1500}{10} = 150$ A $\qquad$ $\mathbf{I_2} = \frac{1500}{20} = 75$ A

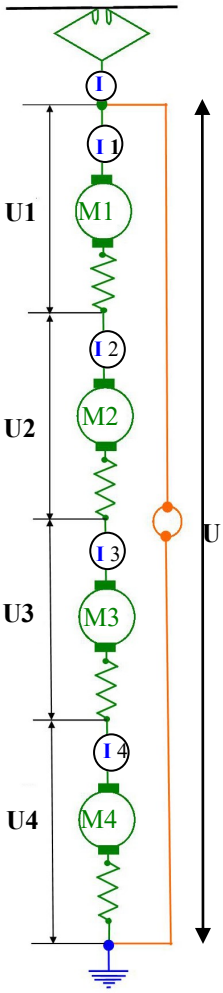
Donc **I** égale bien = 150 + 75 = 225 A

Après le démarrage l'intensité baisse par suite de la rotation de l'induit dans le champ magnétique de l'inducteur. Pour conserver un effort valable, il faut compenser cette baisse d'intensité par une augmentation de tension aux bornes des moteurs de traction. Il faut donc éliminer progressivement une partie du rhéostat.
Cette baisse d'intensité due à la rotation de l'induit entre les pôles inducteurs a pour cause la force contre-électromotrice (f.c.e.m.). Le moteur fonctionne tout à fait comme une génératrice. Ce courant généré s'oppose au courant qui fait tourner le moteur. Plus le moteur tourne vite plus la f.c.e.m. est élevée, plus l'intensité dans le moteur baisse, jusqu'à un moment d'équilibre. Pour augmenter de nouveau la vitesse du moteur il faut augmenter la tension aux bornes, c'est-à-dire éliminer une partie du rhéostat.

Le couplage des moteurs :
Les locomotives comportent le plus souvent deux ou quatre moteurs. Pour limiter le rhéostat de démarrage avec une masse importante et une grosse perte en énergie par effet Joule on couple les moteurs de différentes manières :

Couplage série :

Au démarrage et à basse vitesse, c'est le couplage série qui est utilisé :



En utilisant toujours la même valeur de U = 1500 V, les 4 moteurs ayant tous les mêmes caractéristiques, la tension **U** aux bornes de chaque moteur est dans le cas présent :

$$\frac{1500}{4} = 375 \text{ V}$$

U =U1 +U2 +U3+ U4, d'où **U**= U1 (*375v)* +U2 (*375v)* +U3 (*375v)* +U4 (375v) = 1500 V

Si chaque moteur est traversé par un courant de 500 A (cette intensité est variable en fonction de l'effort moteur demandé et par la vitesse de rotation du moteur) :
$\mathbf{I} = \mathbf{I_1} = \mathbf{I_2} = \mathbf{I_3} = \mathbf{I_4} = 500$ A

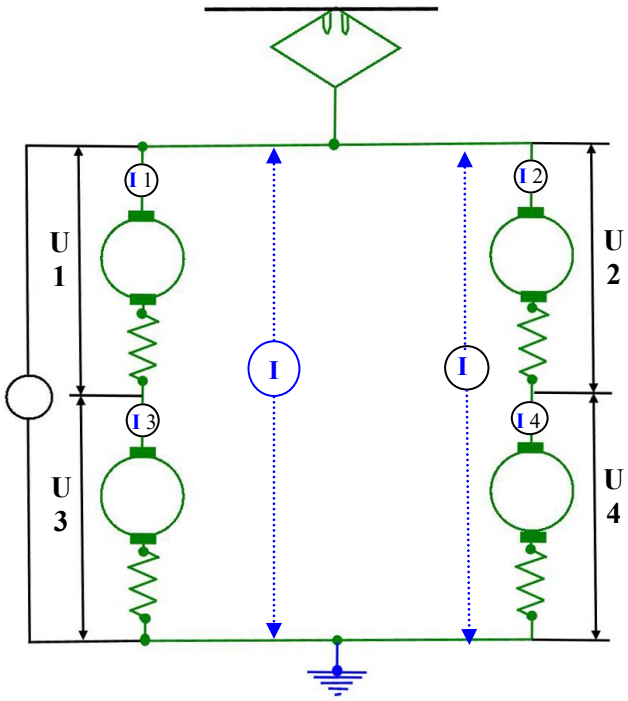
L'intensité captée à la caténaire est de 500 A.

Puissance développée par la locomotive :
Pw = UI ou RI²
Pw = (375 × 500) + (375 × 500) + (375 × 500) + (375 × 500) = 750000 W = 750 KW
Ou Pw = 1500 × 500 = 750000W = 750 KW

1 cv = 736 W = 0,736 KW

Dans le cas présent la locomotive développe : $\frac{750}{0,736}$ = 1019 cv

Couplage série-parallèle :



La tension aux bornes de chaque moteur est :

$$\mathbf{U1 = U2 = U3 = U4} = \frac{1500}{2} = 750 \text{ V}$$

U= (**U1**+**U3**) = (**U2** + **U4**) = 750 V + 750 V = 1500 V

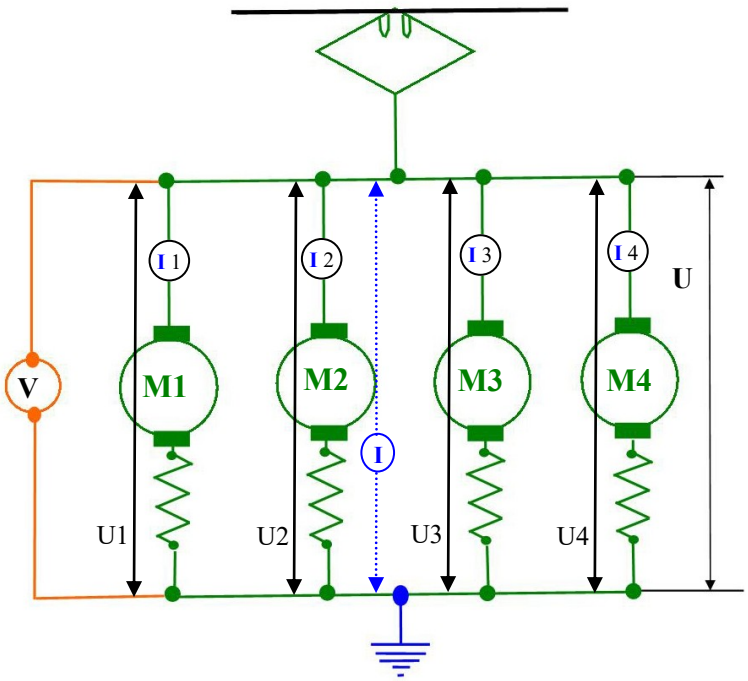
Si **I** est toujours de 500 A dans chaque moteur.

I dans chaque branche de deux moteurs est de 500 A, mais l'intensité captée à la caténaire est de : 500 + 500 = 1000 A

Puissance développée par la locomotive :
Pw = (1500 × 500) + (1500 × 500) = 1500000 W = 1500 KW

Dans le cas présent la locomotive développe : = $\frac{1500}{0,736}$ 2038 cv

Couplage parallèle :



La tension aux bornes de chaque moteur est de :
U = U1 = U2 = U3 = U4 = (1500 V)

Si l'intensité **I** traversant chaque moteur est toujours de 500 A, l'intensité captée à la caténaire est de :

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$$

500 + 500 + 500 + 500 = 2000 A

Puissance développée par la locomotive :
Pw = (1500 × 500) × 4 = 3000000 W = 3000 KW
Dans le cas présent la locomotive développe :

$$\frac{3000}{0{,}736} = 4076 \text{ cv}$$

Le shuntage des inducteurs des moteurs :
Une fois le rhéostat éliminé et l'utilisation du couplage parallèle pour avoir la pleine puissance de la locomotive il existe un moyen supplémentaire d'augmenter sa puissance : c'est le shuntage des inducteurs.

Le shuntage a pour but d'augmenter la gamme des vitesses de marche économique (la marche économique, appelée également plein champ, est une fois toutes les résistances de démarrage éliminées), d'ajouter des vitesses supplémentaires lorsque la tension maximum est atteinte aux bornes des moteurs.
Il peut être obtenu de deux façons :

En dérivant une partie du courant dans une résistance montée en parallèle avec l'inducteur.

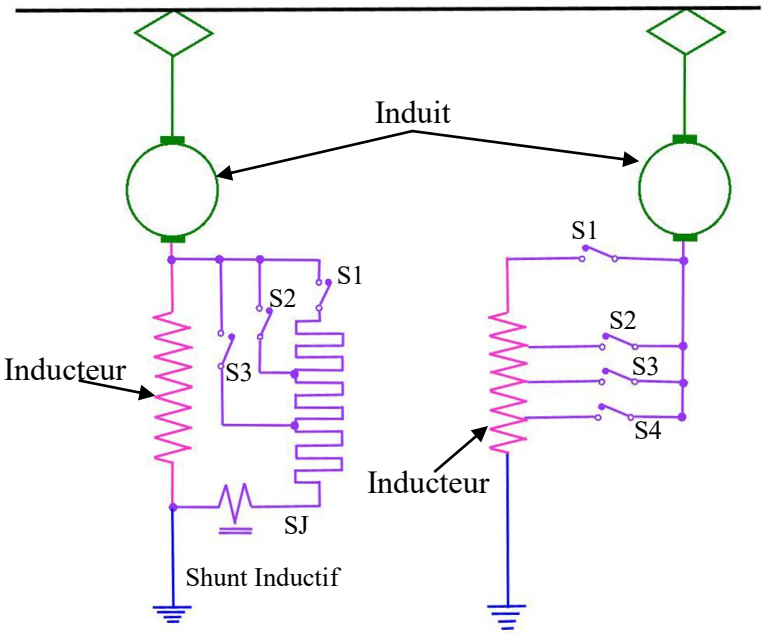
Le shunt inductif (SJ) placé en série avec la résistance de shuntage atténue les conséquences des variations de tension ou d'intensité.
En diminuant le nombre de spires des bobines inductrices sur certaines locomotives de construction ancienne.

Dans les deux cas, la diminution du champ inducteur entraîne une augmentation de l'intensité (idem les résistances en parallèle décrites plus haut) qui crée en définitive une augmentation de l'effort moteur, ce qui va faire croître la vitesse.

On sait que le courant "**I**" qui traverse les inducteurs fait tourner le moteur, nous avons retiré une partie en shuntant, il semblerait que la puissance du moteur doive diminuer, mais comme le courant « **I** » a augmenté fortement dans l'induit, le gain de puissance sera supérieur à la perte.

Ceci n'est valable que lorsque le moteur tourne à une vitesse qui permette à l'intensité d'atteindre une valeur suffisante.

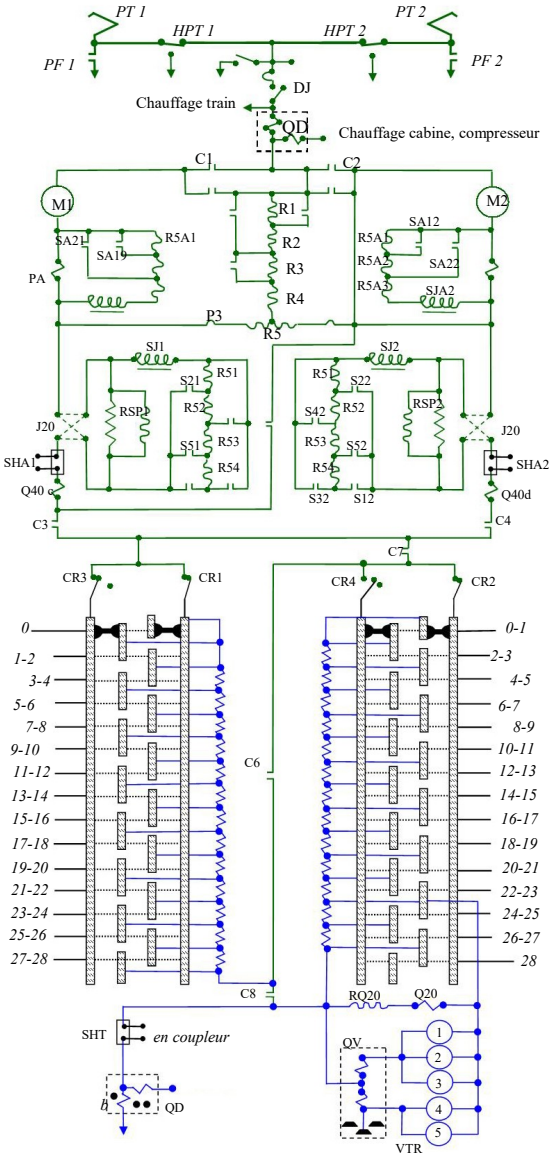
En résumé il y a trois causes qui peuvent faire varier le courant "**I**" pendant la marche :
Variation de la vitesse de rotation du moteur pendant que la tension aux bornes est maintenue constante :
"**I**" augmente quand la vitesse diminue.

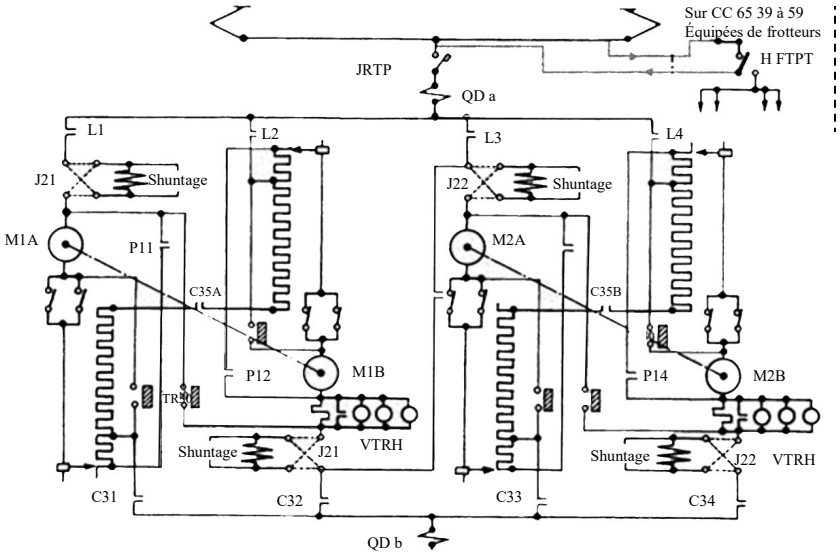


"**I**" diminue quand la vitesse augmente.

Variation de la tension aux bornes pendant que la vitesse de rotation du moteur est constante :
"**I**" augmente avec la tension.
Le shuntage des inducteurs.
L'effort moteur suit les variations de l'intensité "**I**".

Circuit de puissance d'une BB 9400 (2 moteurs de traction)
Schéma ci-contre:





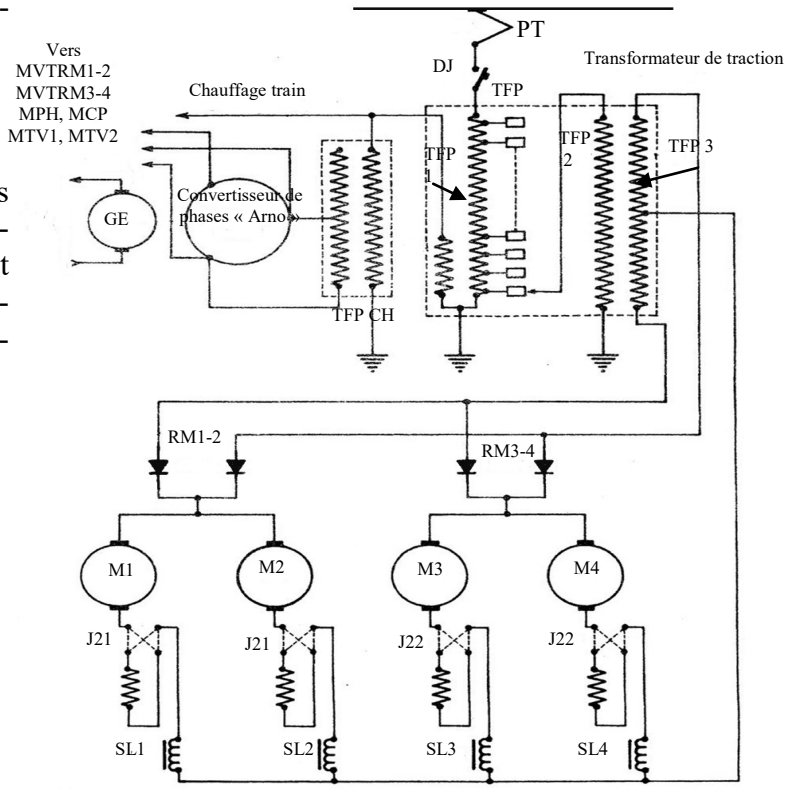
Circuit de puissance d'une CC 6500
(4 moteurs de traction, 2 moteurs par bogie calés sur un même axe, moteurs tandem)

LOCOMOTIVES Á COURANT MONOPHASÉ :

En dehors de certaines séries de locomotives (BB 12000/CC 14000 par exemple), les locomotives à courant monophasé construites avant l'arrivée des BB 26000 sont la plupart équipées de moteurs série-continu (la 26001 a été livrée le 1er avril 1988, cette livraison avait été retardée suite au programme prioritaire de livraison de locomotives à la Chine. Le TGV Atlantique est arrivé en 1989).

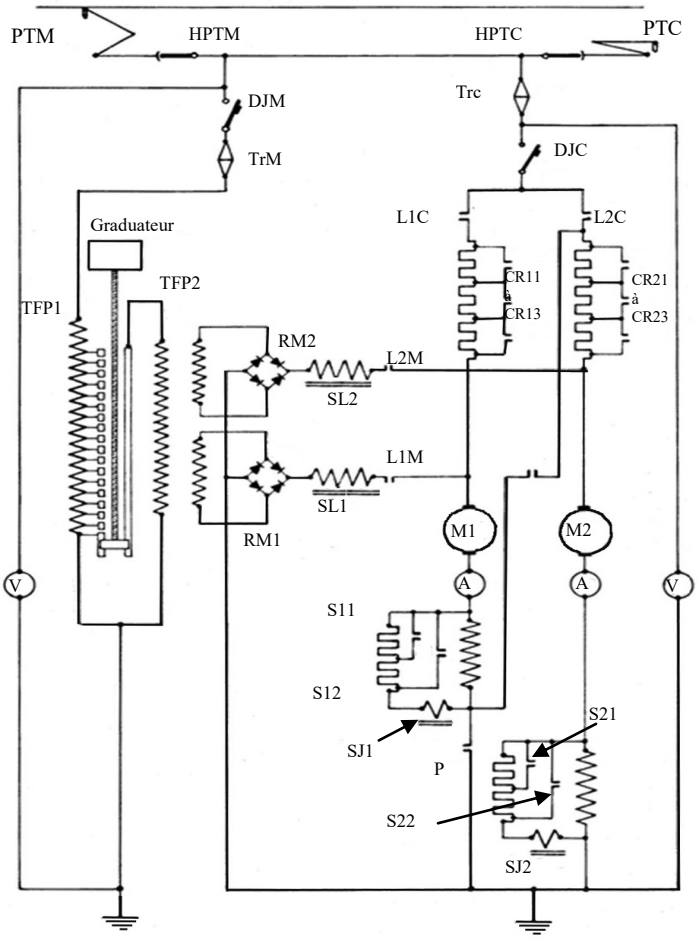
L'avantage énorme de ces locomotives est la suppression du rhéostat de démarrage. La variation de puissance aux bornes des moteurs, toujours montés en parallèle, se fait par un réglage de la tension.

C'est un autotransformateur qui reçoit le courant de la caténaire. Sur les spires de cet autotransformateur se trouvent des plots qui permettent d'alimenter entre 0 et 15000 V, grâce à un graduateur de tension, le primaire d'un transformateur de traction. Le secondaire de ce transformateur délivre une tension de 0 à 1050 V environ. L'alimentation des moteurs se fait par l'intermédiaire d'un pont de redresseurs au silicium et self de lissage. C'est le point milieu du secondaire du transformateur de traction qui constitue le retour d'alimentation des moteurs.



Circuit de puissance d'une BB 16000 (4 moteurs de traction).

LOCOMOTIVES BI-COURANT :

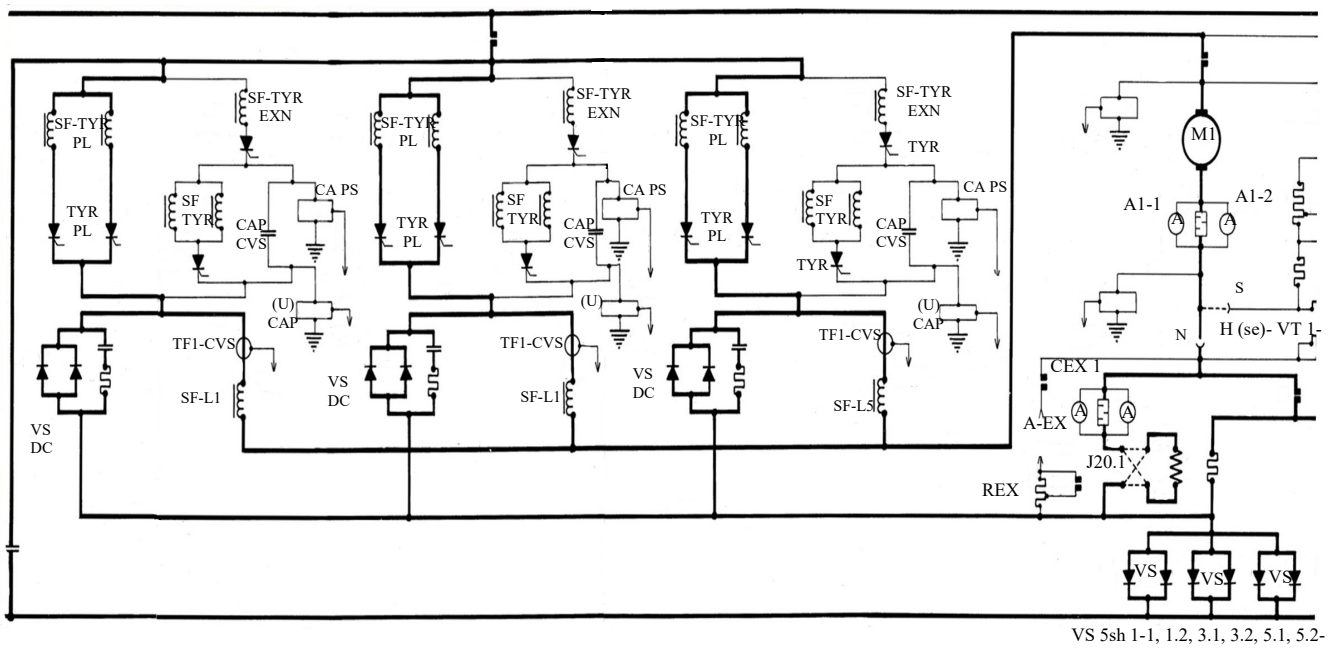


Ces locomotives comportent à la fois les circuits traction continu (rhéostat et couplages) et alternatif (transformateurs, redresseurs, self de lissage). Seuls les moteurs, les inverseurs et les shunteurs sont communs.

Circuit de principe de puissance d'une locomotive bi-courant (2 moteurs de traction).

LOCOMOTIVES BB 22200 :

Ce sont les premières locomotives bi-courant en service commercial équipées de hacheurs de courant donc plus de rhéostat de démarrage (voir article traitant les hacheurs de courant sur notre site de l'ACTGV). Mais elles étaient toujours équipées de 2 moteurs série-continu développant 2200 KW chacun.

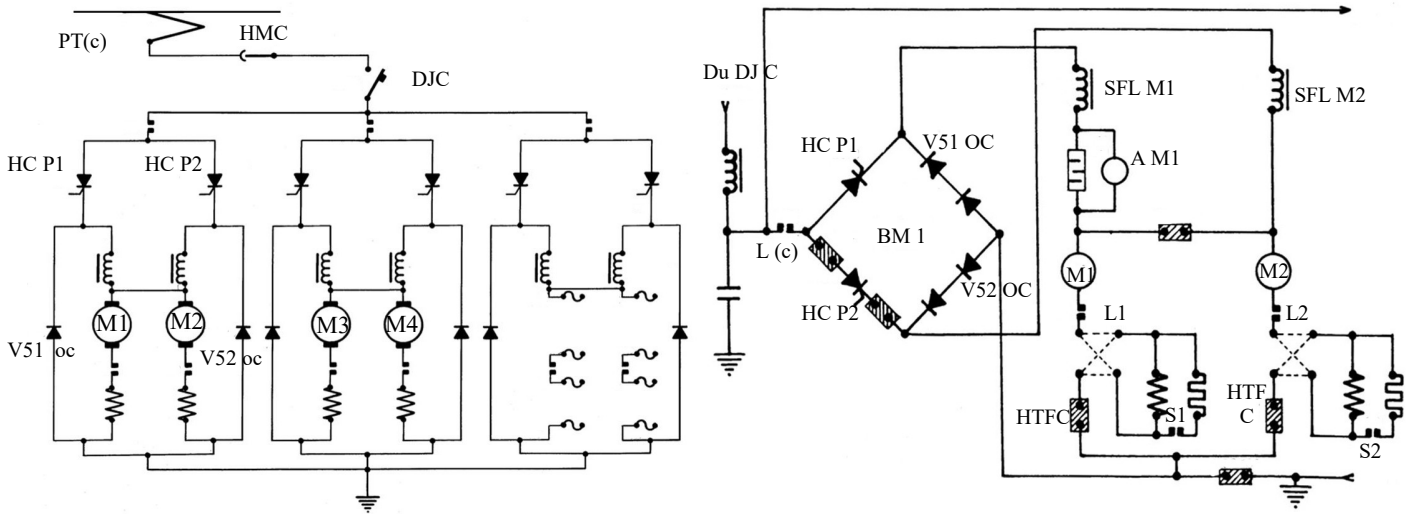


Circuit de puissance de BB 22200.

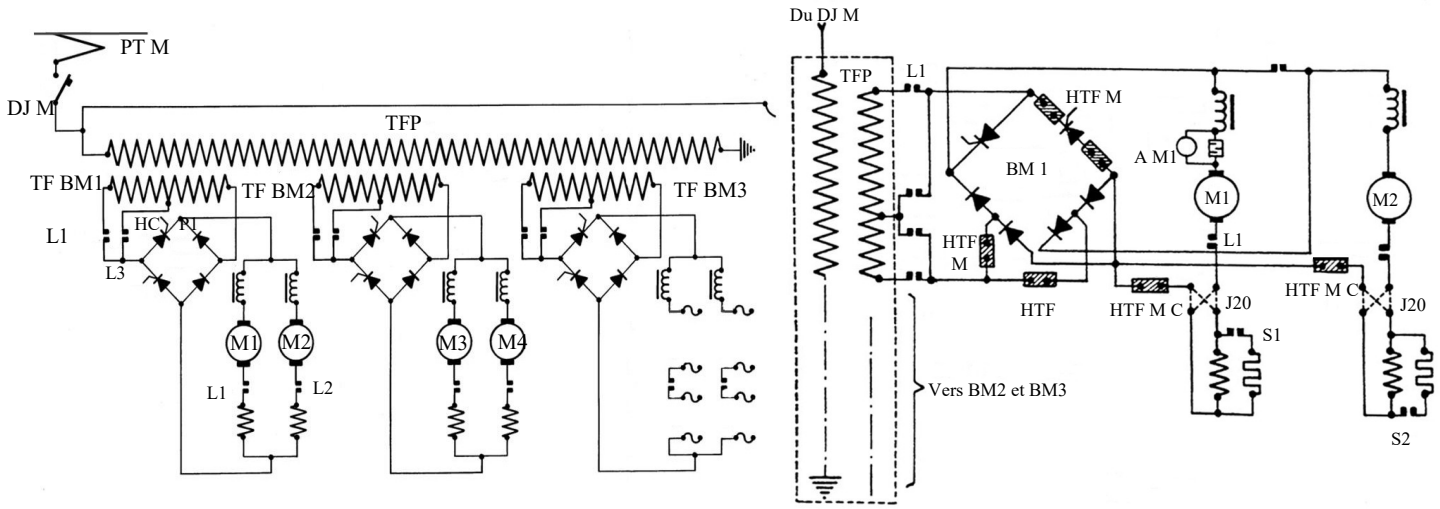
TGV SUD-EST :

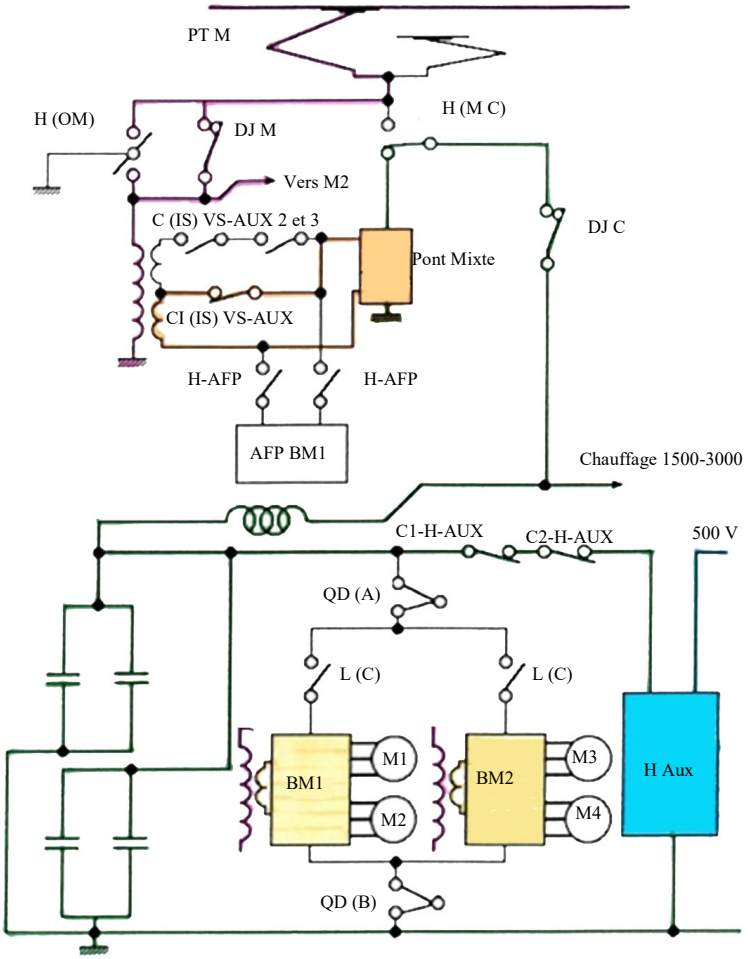
La technologie de base des BB 22200 a été retenue sur les TGV SE, notamment les hacheurs de courant ainsi que les moteurs série-continu. Chaque motrice possédant deux bogies moteurs et les remorques extrêmes un bogie moteur. Chaque bogie a deux moteurs de traction fixé sous la caisse. Ces TGV fonctionnent sous 1500 V continu et 25000 V monophasé, certaines rames qui vont sur la Suisse sont équipées pour le 15000 V 16 « 2/3 »monophasé. La commande basse tension est encore analogique.

Circuit de puissance en courant continu



Circuit de puissance en courant monophasé





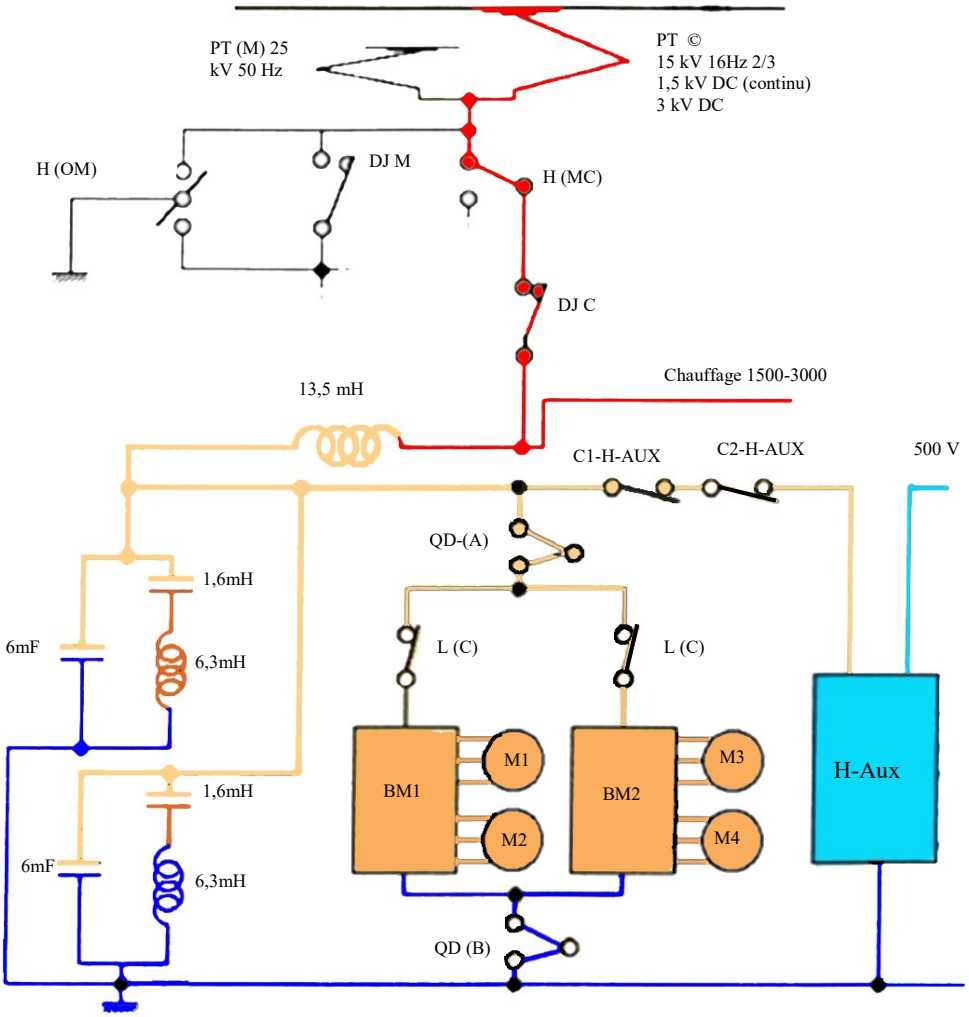
TGV ATLANTIQUE/RÉSEAU/ DUPLEX/PBA/PBKA :

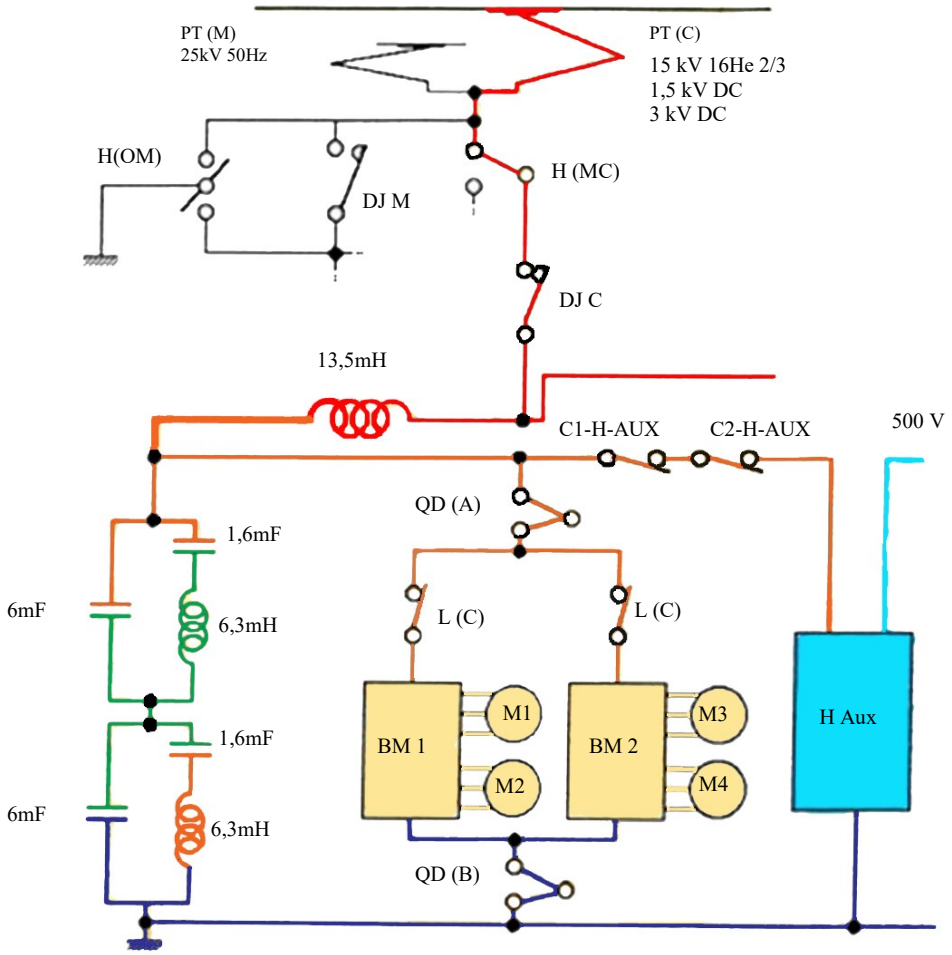
C'est l'arrivée de la commande numérique et de l'informatique embarquée (SIE) avec le réseau TORNAD qui équipe toutes les rames dans la filiation des TGV Réseau. Le moteur série-continu disparait. La motorisation synchrone est utilisée avec des moteurs triphasés alimentés par des onduleurs (voir article traitant les moteurs synchrones autopilotés sur notre site de l'ACTGV).

TGV PBKA
en configuration 25KV 50HZ SNCF

TGV PBKA
en configuration
1500V SNCF

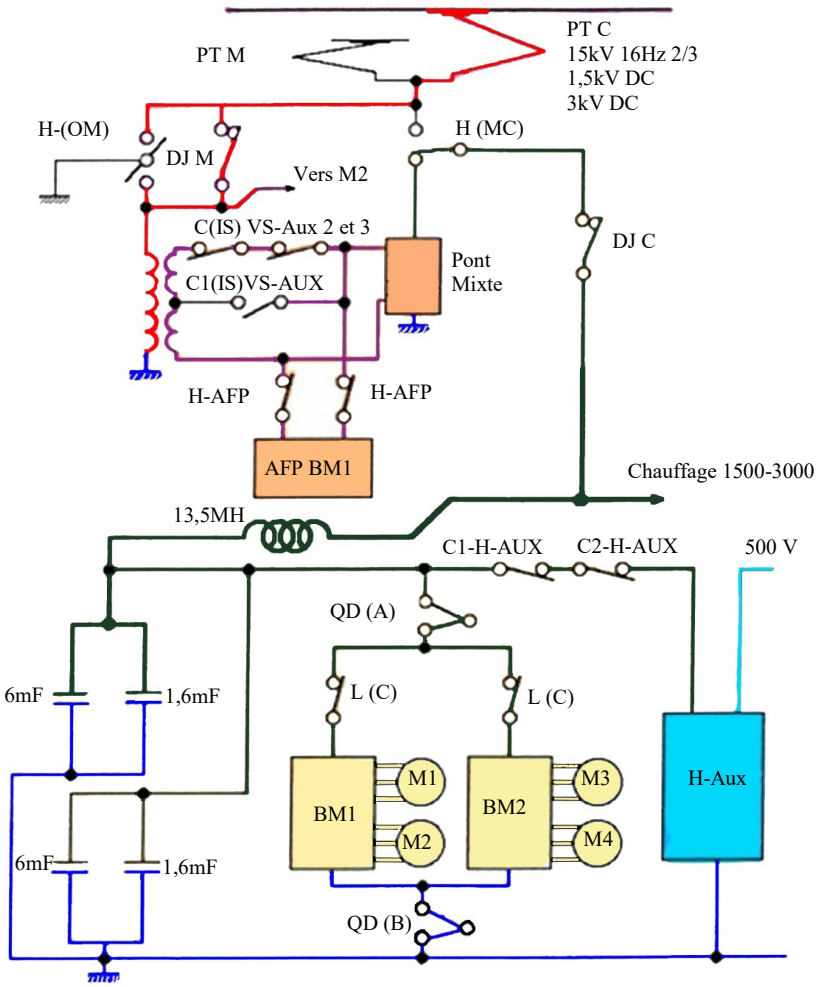
Dans cette configuration, il s'agit d'un filtre parallèle dont la self principale est de 13,5mH et dont la capacité équivalente est de 12mF. Il est à noter qu'un filtre accordé est associé en parallèle sur chaque capacités principales; la valeur de la fréquence d'accord du filtre est fixée à 50 Hz



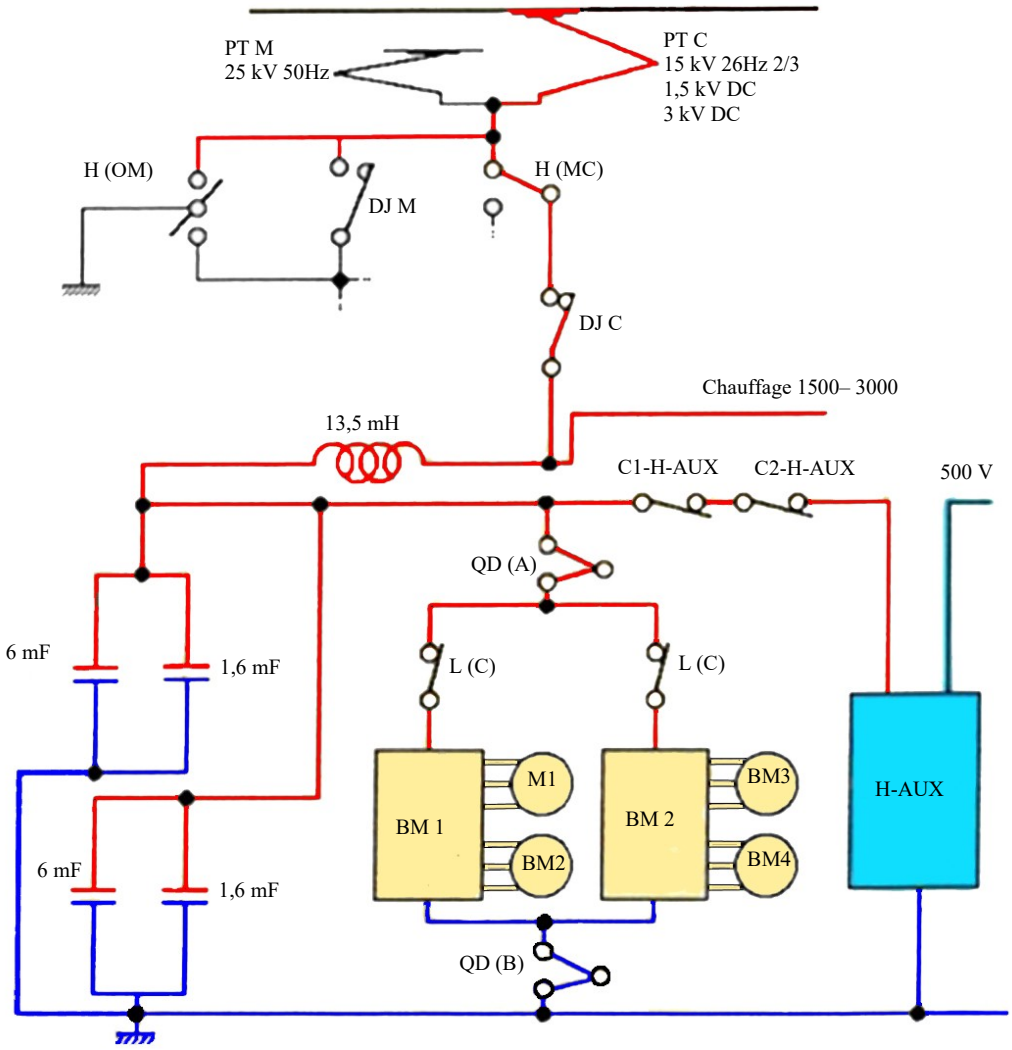


TGV PBKA en configuration 3000 V SNCB

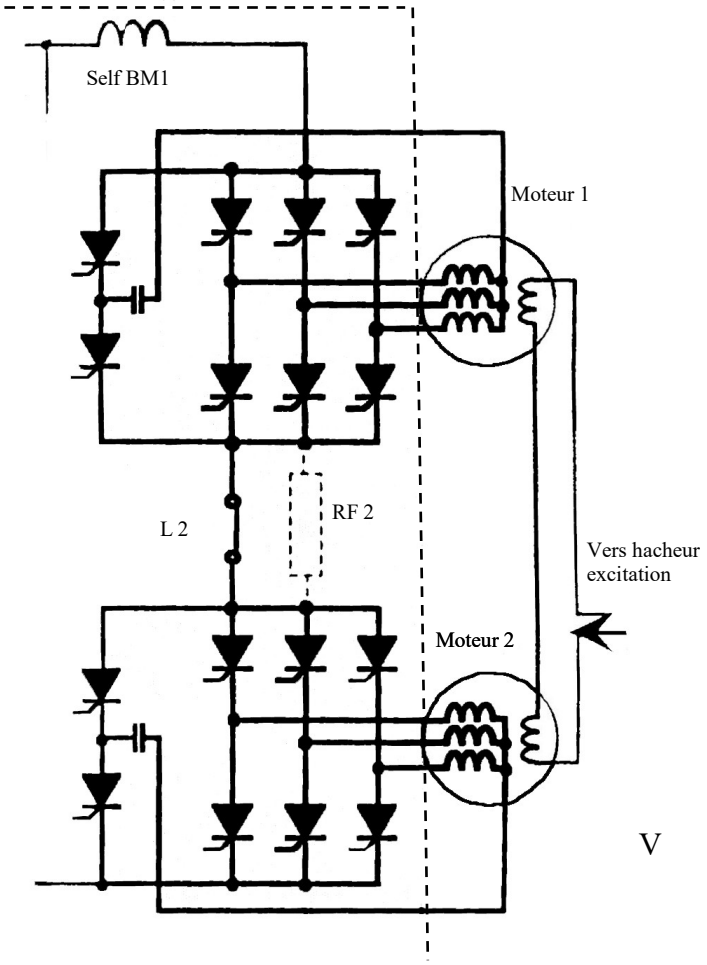
Dans cette configuration, le filtre est un filtre série, dont la self principale est de 13,5mH et dont la capacité équivalente est de 3mF; il est à noter qu'un filtre accordé est associé en parallèle sur chaque capacités principales. La valeur de la fréquence d'accord du filtre est fixée à 50Hz.



TGV PBKA
En configuration 15kV 16Hz 2/3 DB



TGV PBKA
En configuration 1500V NS
Dans cette configuration, il s'agit d'un filtre parallèle dont la self principale est de 13,5 mH et dont la capacité équivalente est de 15,2 mF. Il est à noter que le filtre accordé associé en parallèle sur chaque capacités principales n'existe pas dans cette configuration.



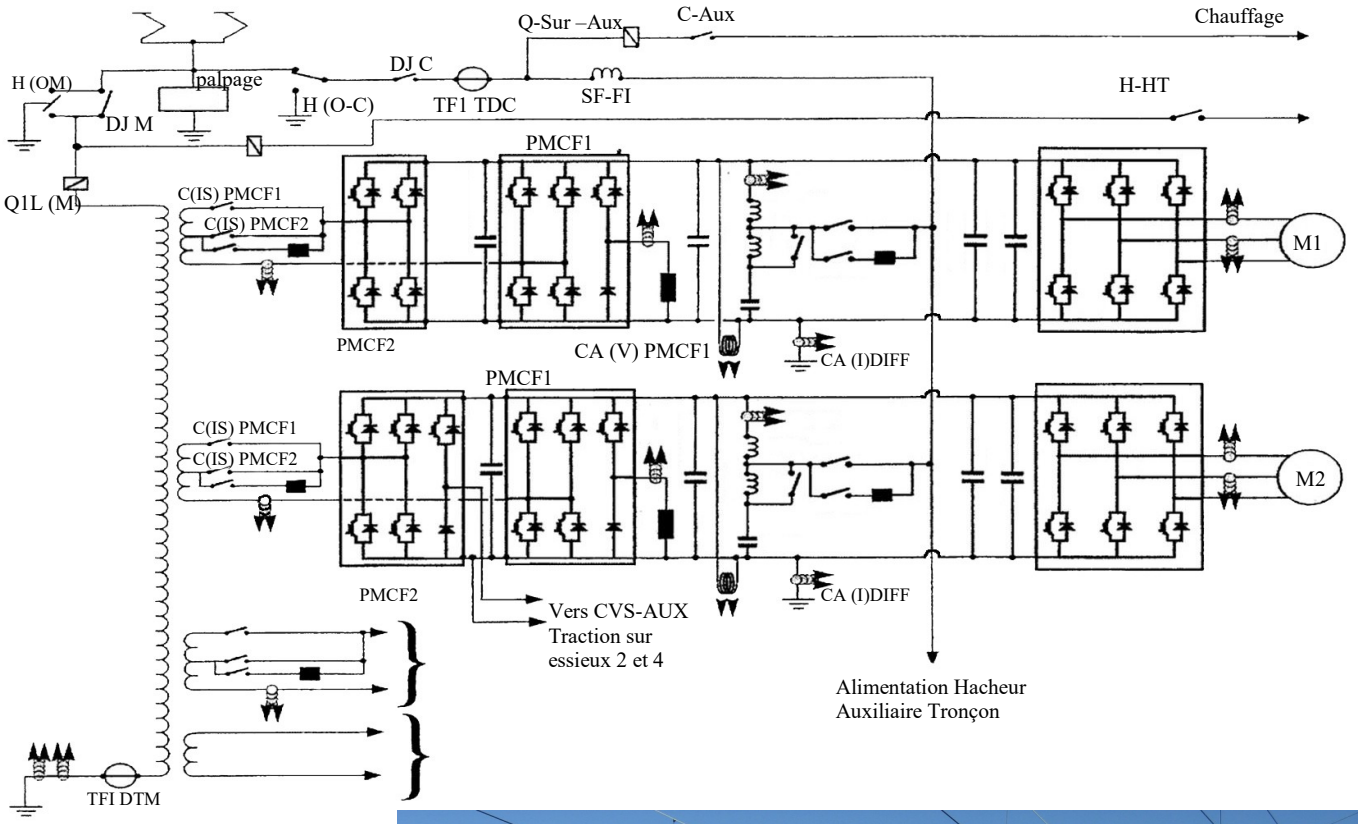
Onduleurs
Schémas de principe des circuits de traction des TGV PBKA qui fonctionnent sous 25000 V, 1500 (SNCF/NS), 15000 V 16 2/3 et 3000 V continu.

TGV POS :

Nouvelle technologie avec la mise en service du TGV EE et l'arrivée du TGV POS avec le moteur asynchrone à cage. Le moteur dispose de trois paires de pôles et est à ventilation forcée. Sa puissance nominale est de 1200 KW pour une masse de 1350 Kg.

Sous monophasé (France, Luxembourg, Allemagne), le secondaire du transformateur principal alimente par un enroulement un bus qui fourni l'énergie à un convertisseur 4 cadrans appelé aussi PMCF (Pont Mixe à Commutation Forcée - voir article traitant les PMCF sur notre site de l'ACTGV).

Ce convertisseur utilise des modules IGBT. Sous continu chacun des bus est connecté à la self du filtre principal par l'intermédiaire d'un contacteur d'isolement et à un dispositif de pré-charge des capacités du bus de tension.



Article proposé par M Durochat et Gilbert Desplanques Photos de Jean Willemin.