

HACHEUR de COURANT

L'ACTGV a publié, dans le bulletin d'informations de décembre 1994, un article sur ce sujet. Brillant article rédigé par M. André COSSIE, Ingénieur à la SNCF, dont les qualités professionnelles exceptionnelles étaient accompagnées d'une remarquable aisance en matière de vulgarisation. Cet article était, par ailleurs, préfacé par Ms ROY (Secrétaire de l'ACTGV) et JODAR (agent de l'OCTGV/PSE). Il est apparu utile, à l'intention des jeunes tégévistes qui rejoignent l'ACTGV et à tous nos adhérents de développer à nouveau ce thème puisque cette technologie concerne désormais la majorité du parc SNCF.

La génération d'engins à moteurs à courant continu utilisant des éléments électroniques de puissance a permis de donner une nouvelle impulsion à ce mode de traction désormais le plus répandu.

Les inconvénients présentés par les engins moteurs ancienne génération (à rhéostat) comme le manque de souplesse de la conduite lié au nombre limité de crans de marche et surtout les pertes d'énergie gaspillée dans les résistances ont disparu.

- 1 - Rappel du problème posé par la mise en vitesse d'un train en traction électrique.

De par ses caractéristiques le moteur à courant continu à excitation série est actuellement le plus communément utilisé en traction électrique. L'utilisation de ce type de moteur pose néanmoins un certain nombre de problèmes et, en particulier, celui de sa mise en vitesse. A titre d'exemple la résistance interne d'un moteur à courant continu de 2 000 kW (équipant les locomotives BB 15000) est d'environ 0,02 ohm; si l'intensité nécessaire pour obtenir le démarrage de la locomotive est de 400 ampères, la tension à appliquer aux bornes de ce moteur doit donc être: $0,02 \times 400 = 8$ volts.

Or la tension délivrée par la caténaire est de 25000 volts en monophasé et de 1500 volts sur lignes électrifiées en courant continu :

- en 25000 volts il est aisé d'abaisser la tension d'un courant alternatif à l'aide d'un transformateur classique ;
- en 1500 volts continu il n'en est pas de même et jusqu'à ces derniers temps il était nécessaire d'abaisser artificiellement la tension délivrée par la caténaire :
 - par l'utilisation de différents couplages des moteurs de traction,
 - par l'utilisation de résistances placées en série avec les moteurs.

Dans le cas du moteur cité ci-dessus, lors du démarrage la puissance absorbée par les moteurs de traction (locomotive à deux moteurs couplés en série) serait de: $400 \times 8 \times 2 = 6\,400$ watts ou 6,4 kW alors que la puissance fournie par la sous-station serait de $= 1\,500 \times 400 = 600\,000$ watts ou 600 kW.

Ce rapide calcul fait apparaître, indépendamment d'autres inconvénients dans le domaine de la conduite que nous verrons ultérieurement :

- d'une part les pertes importantes dissipées par « effet joule » dans le rhéostat, en particulier, lors de la remorque de trains à arrêts fréquents (banlieue)
- d'autre part les puissances instantanées importantes que doivent fournir les sous-stations, en particulier lorsque plusieurs trains démarrent simultanément dans un même secteur électrique.

D'où l'intérêt des recherches tendant à obtenir simplement toutes les valeurs de tension nécessaires à la mise en vitesse d'un moteur alimenté en courant continu.



BB15000

- 2 - Comment transformer simplement la tension d'un courant continu.

Une idée simple consiste à débiter la tension constante fournie par un générateur à courant continu en tranches fines suivant un rythme assez rapide dont on fait varier la durée et les intervalles.

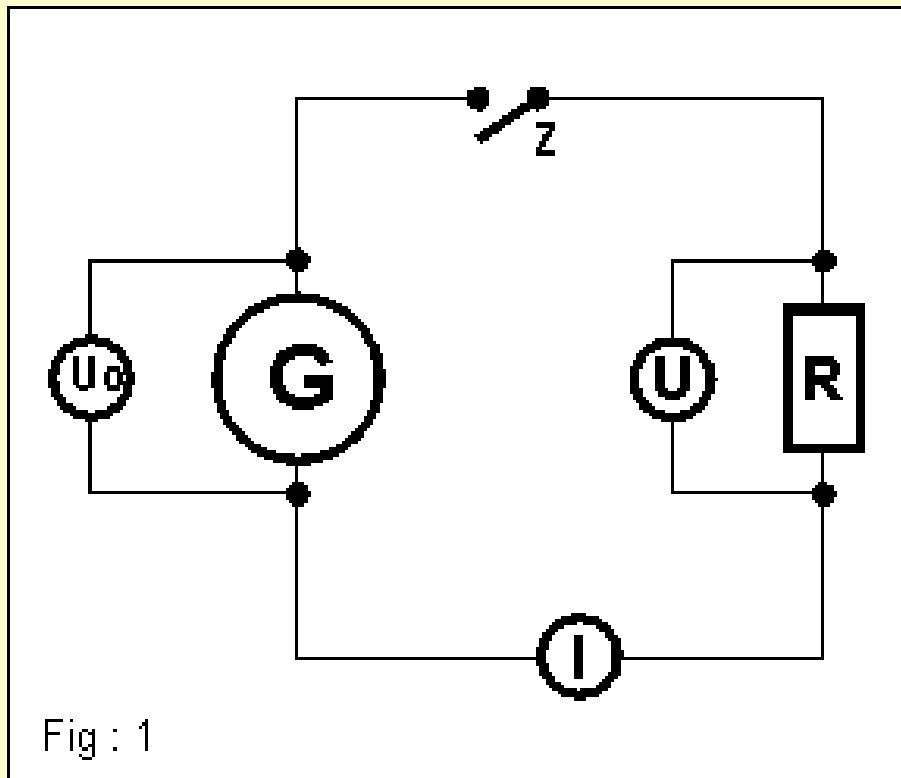


Fig : 1

Dans le schéma, le générateur G fournit une tension constante U_0

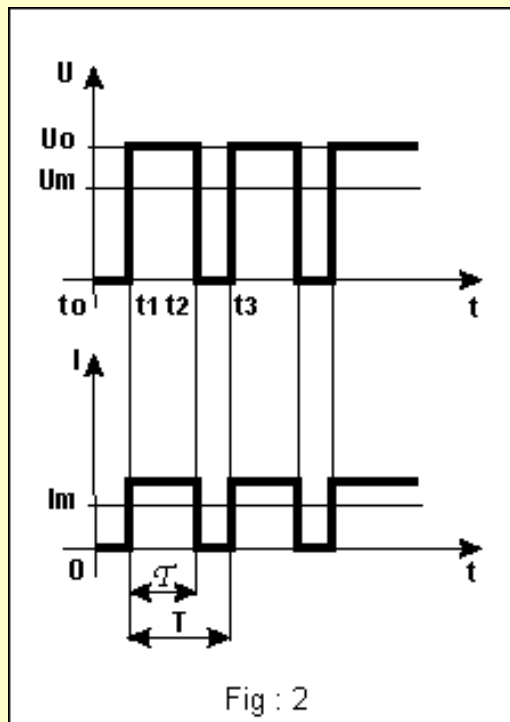


Fig : 2

- à l'instant t_0 l'interrupteur Z étant ouvert, la tension U aux bornes du récepteur « R » (résistance pure) est égale à 0 ;
- à l'instant t_1 , l'interrupteur Z étant fermé, la tension U aux bornes du récepteur passe de 0 à U_o , tension fournie par le générateur ;
- à l'instant t_2 , l'interrupteur Z étant ouvert, la tension U passe de la valeur U_o à 0 ;
- à l'instant t_3 , l'interrupteur Z est fermé et U passe de 0 à la valeur U_o ,.....etc....

Les effets engendrés dans le récepteur R par le passage à intervalles réguliers du courant $I = U_o/R =$ sont équivalents à ceux qui seraient engendrés par un courant moyen I_m traversant le récepteur d'une façon continue. Ce courant moyen I_m serait le résultat de l'application d'une tension moyenne $U_m = R \times I_m$ appliquée aux bornes du récepteur et qui serait proportionnelle :

- à la période de fonctionnement de l'interrupteur Z : T ;
- au temps de fermeture de l'interrupteur Z: T' (ou temps de conduction),

On voit que, pour une même période de fonctionnement T, si l'on fait varier le temps de conduction entre 0 et T, la tension moyenne U_m varie de 0 à U_o (tension maximale délivrée par le générateur).

Le principe énoncé ci-dessus est celui du «Hacheur de courant» dont la réalisation n'est devenue possible qu'avec l'emploi des diodes et des thyristors. En effet seule l'électronique permet d'obtenir le fonctionnement d'un tel dispositif à cadence rapide (de l'ordre de la milliseconde (μs)),

- 3 - Notions fondamentales sur les hacheurs.

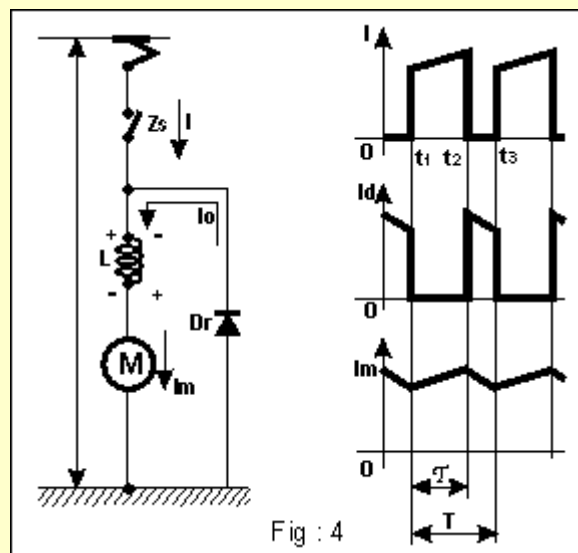
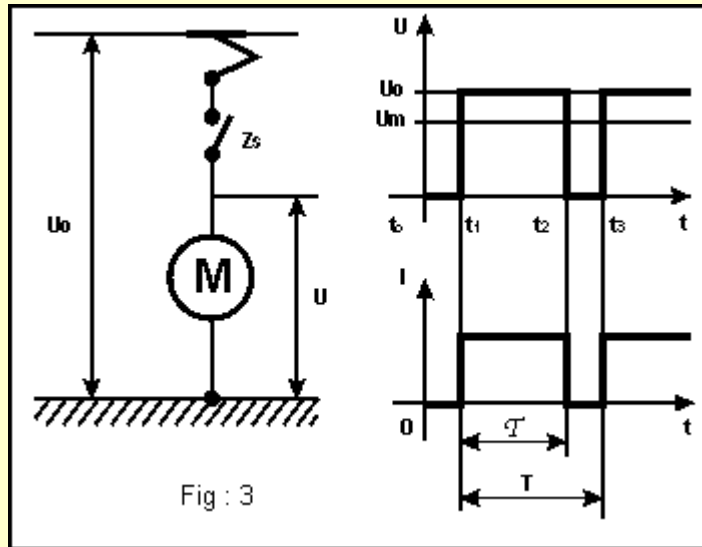
En partant du principe énoncé ci-dessus, le schéma de principe d'une locomotive à courant continu (un seul moteur) peut être celui de la figure 2 ci-dessus dans laquelle un interrupteur statique Z_s permet la mise sous tension périodique du moteur. La tension moyenne U_m appliquée aux bornes du moteur varie avec le temps de fermeture de l'interrupteur.

Toutefois ce schéma simple montre que l'intensité obtenue est discontinue. Par suite afin d'obtenir une intensité continue il est nécessaire de compléter le schéma de la figure 4 par l'adjonction d'une self de lissage « L » et d'une diode de roue libre « Dr » (figure 5). Avec ce nouveau schéma :

- à l'instant t_1 lorsque l'interrupteur Z_s se ferme, l'établissement du courant I est freiné par la self L qui se comporte comme un récepteur ;

- à l'instant t_2 l'interrupteur Z_s s'ouvrant, le courant I s'annule; la self L se comporte alors comme un générateur qui tend à s'opposer à la diminution de l'intensité I_m traversant le moteur. La self L engendre un courant I_D , de même sens que I dans le moteur, qui passe par la diode de roue libre D_r ;
- à l'instant t_3 l'interrupteur Z_s se ferme et le cycle recommence.

Grâce à ce montage le moteur est traversé en permanence par un courant ondulé I_m .



En réalité la tension périodique délivrée aux bornes du moteur par le hacheur se décompose en deux tensions: une composante alternative et une composante continue (figure 5). La self induction du moteur étant très faible par rapport à celle de la self L , la composante continue (tension moyenne U_m) apparaît pratiquement aux bornes du moteur alors que la composante alternative se trouve reportée aux bornes de la self de lissage dont les variations de flux donnent naissance à la force électromotrice qui engendre le courant I_D pendant le temps $(t_3 - t_2)$ où l'interrupteur statique ne conduit pas.

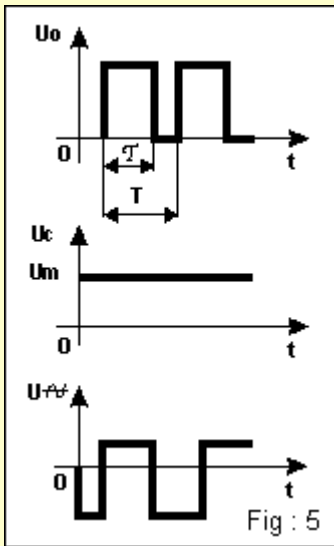
La tension appliquée aux bornes du moteur est donc une tension continue qui a pour valeur moyenne

$$U_c = U_m = U_o.$$

T = Période de T / T fonctionnement de l'interrupteur statique Z_s ,

T = temps de conduction,

T / T = rapport cyclique. T



Dans le cas du moteur de 2 200 kW pour obtenir la tension moyenne de 8 volts au démarrage, la tension ligne U_0 étant de 1 600 volts, le rapport cyclique devra être égal à $1/200$; c'est-à-dire que si $T = 1$ seconde, le temps de conduction T' de l'interrupteur Z_s devra être de 5 millisecondes (nous verrons plus loin les problèmes posés par l'obtention des basses tensions de démarrage).

Le hacheur se comporte donc comme un transformateur de tension dont le rapport de transformation est égal au rapport cyclique.

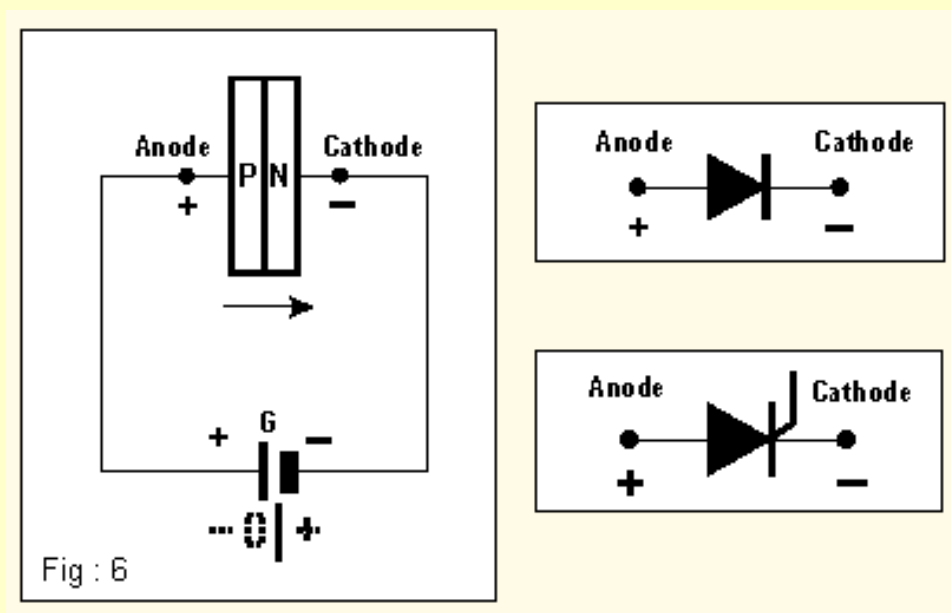
- 4 - Ouverture de l'interrupteur statique Z_s (extinction du Thyristor de commande).

A - rappel de quelques notions fondamentales sur les conditions de fonctionnement des diodes et thyristors (ou thyatron) :

• **a) diode ou redresseur sec**

est essentiellement constituée de deux couches de semi-conducteurs de conductibilité respectives du type **P** (positif) et **N** (négatif) (figure 6). L'état conducteur ou non d'une diode est uniquement fonction de la polarité de son anode et de sa cathode :

- lorsque la borne **+** du générateur **G** est reliée à l'anode de la diode et la borne **-** à la cathode, la diode est dite «passante», un courant circule en traversant la diode ;
- lorsque le générateur est connecté dans le sens inverse, la diode est bloquée et aucun courant ne circule à travers celle-ci.



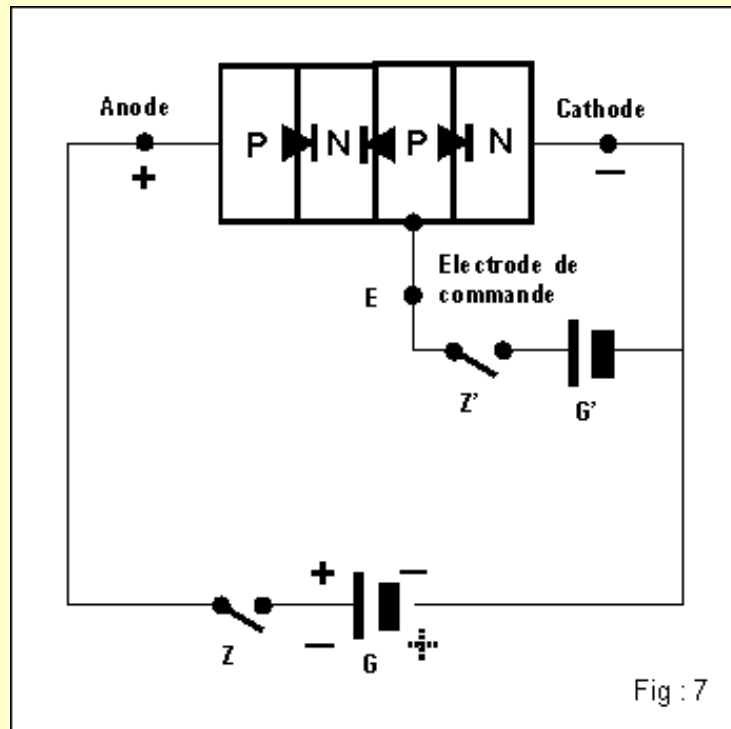
• **b) le thyristor ou redresseur commandé (ou thyatron)**

comprend essentiellement 4 couches semi-conductrices de conductibilité alternées **P.N.P.N.** (figure 7)

l'extrémité **P** est l'anode, l'extrémité **N** est la cathode; la région centrale **P** est l'électrode de commande (**E**). En l'absence d'impulsion de commande sur l'électrode **E**, le thyristor est toujours «*non conducteur*», quel que soit le branchement du générateur **G**,

Lorsque la borne **+** d'un générateur **G'** est reliée à l'électrode de commande **E** :

- si la borne **+** d'un générateur **G** est reliée à l'anode du thyristor et la borne **-** à la cathode, le thyristor est «passant», un courant circule en traversant le thyristor. A noter que si la liaison entre **G'** et **E** est interrompue (ouverture de **Z'**) le courant principal traversant le thyristor continue de passer.
- lorsque le générateur **G** est connecté dans le sens inverse, le thyristor est bloqué et aucun courant ne circule à travers lui,



Lorsque le thyristor est passant (générateur «**G**» convenablement connecté et impulsion donnée à l'électrode «**E**») le courant qui le traverse ne peut être interrompu que par l'ouverture de l'interrupteur **Z** ou si **la tension appliquée à la cathode (borne - du thyristor) devient supérieure à celle de l'anode (borne + du thyristor)** :

- si le thyristor est relié à un générateur fournissant du courant alternatif, lors de l'alternance pendant laquelle la borne **+** du générateur est reliée à l'anode du thyristor, celui-ci se débloque dès qu'une impulsion est donnée à l'électrode de commande; à la fin de cette alternance l'intensité traversant le thyristor devenant nulle celui-ci s'éteint automatiquement (figure 8).
- si le thyristor est relié à un générateur à courant continu, son extinction nécessite un montage particulier que nous étudierons ci-après.

Le processus décrit ci-dessus recommence à chaque période T de fonctionnement du hacheur, l'instant de déblocage de $Th2$ variant en fonction du temps de conduction « T » à obtenir,

- 5 - Influence des engins moteurs à hacheurs sur les circuits HT de signalisation et de télécommunication.

L'intensité prélevée à la source (caténaire) par une locomotive à hacheur se présente comme une succession de créneaux. Une telle forme de courant est gênante car:

A) - elle entraîne des chutes de « tension caténaire » à chaque ponction de courant correspondant au temps de conduction du hacheur (figure 10), La forme de la tension caténaire se trouve donc perturbée et risque d'altérer le fonctionnement des autres locomotives se trouvant dans le même secteur électrique (commutation des moteurs électriques des auxiliaires notamment).

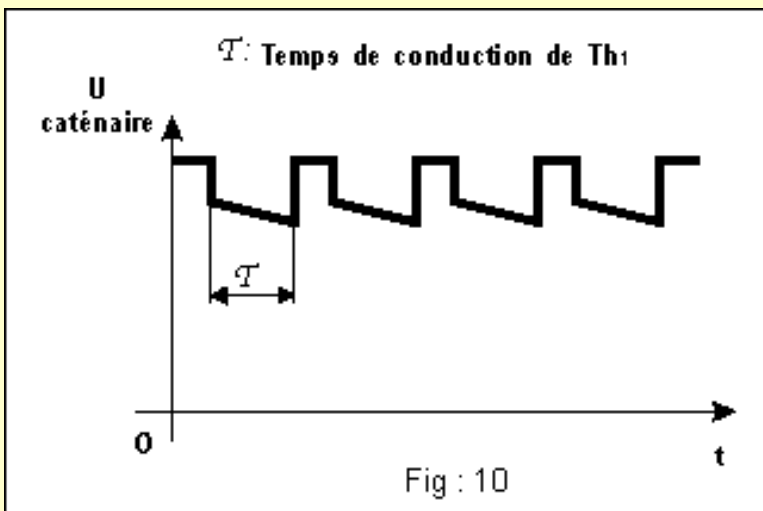
B) - elle risque de perturber les circuits de signalisation. En effet :

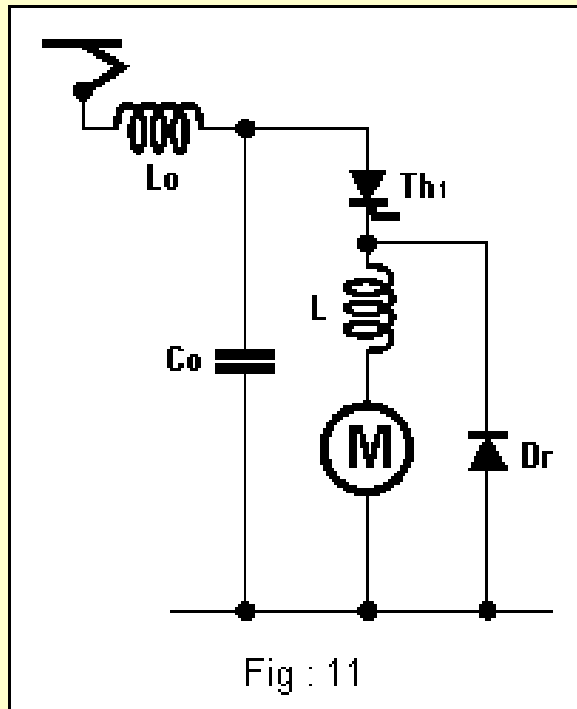
- le courant circulant dans la caténaire varie de 0 à I max suivant la fréquence de fonctionnement du hacheur. Un tel courant se décompose en un courant fondamental et en plusieurs courants secondaires, appelés harmoniques, dont la fréquence est un multiple de la fréquence de base (si la fréquence du hacheur est de « x » hertz, les harmoniques ont pour fréquence $2x$, $3x$, $4x$ hertz)
- les circuits de signalisation équipant les lignes électrifiées en 1 500 volts continu, utilisent des courants alternatifs de fréquences différentes suivant les lignes (à titre d'exemple: 50 Hz, 75 Hz, 85 Hz, 125 Hz, 175 Hz).

C) - elle risque de perturber les circuits de télécommunication lorsque ceux-ci sont aériens, ce qui est le cas notamment sur certaines sections de ligne du Réseau SUD-OUEST,

Afin de régulariser les ponctions d'intensité dans la caténaire on intercale entre la ligne et le hacheur un filtre constitué par une self L_o et une capacité C_o (figure 11). La capacité joue le rôle d'un réservoir; pendant les intervalles de temps où le hacheur $Th1$ ne conduit pas, C_o se charge. Lorsque $Th1$ conduit :

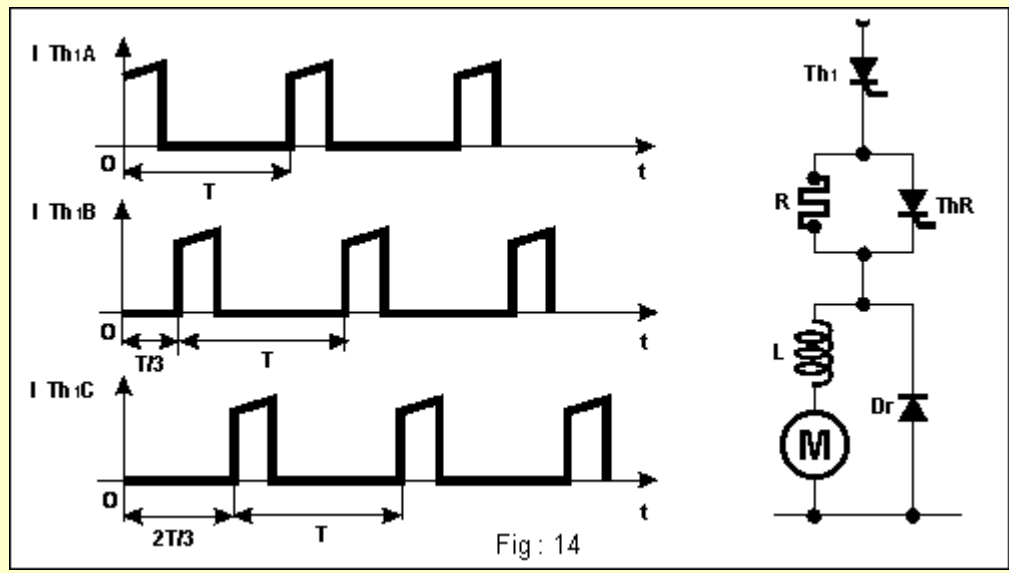
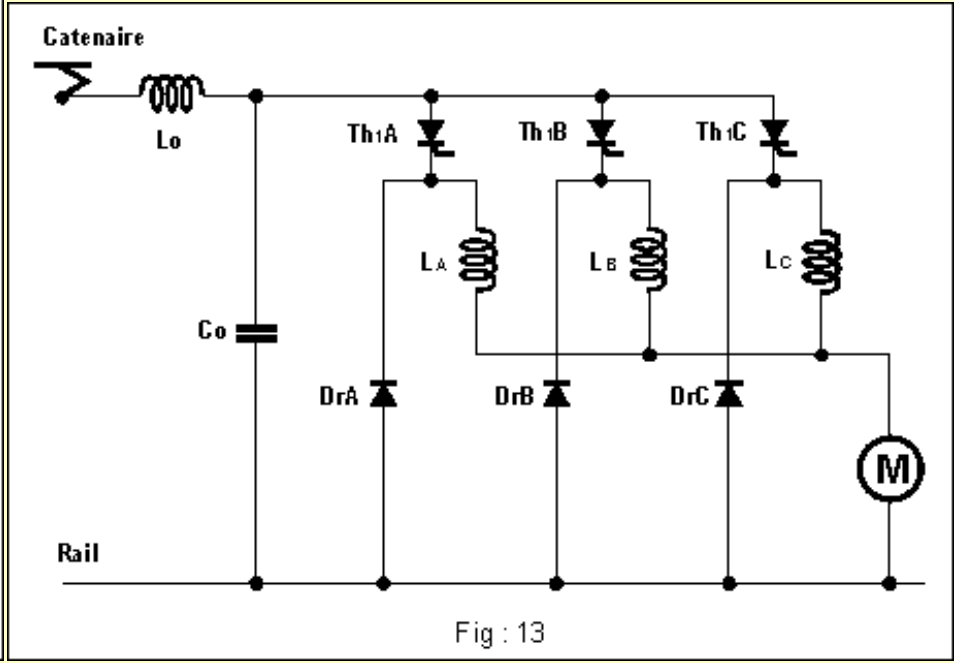
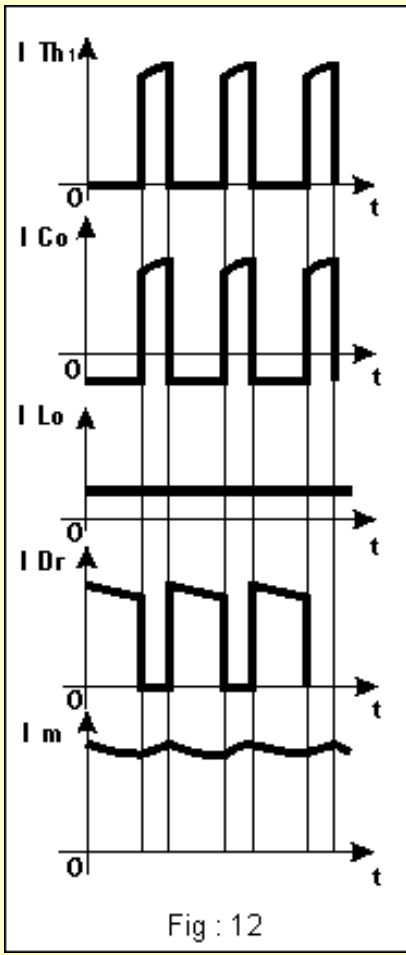
- la self L_o limite l'accroissement de courant en provenance de la caténaire,
- la capacité C_o se décharge et fournit la plus grande partie du courant dans le circuit du moteur M ,





(1) Pour que Th1 s'éteigne il faut que U_B soit supérieure à U_A pendant un temps suffisant, appelé « temps de désamorçage ». A titre indicatif ce temps est de l'ordre de 25 micro secondes au lieu de 200 μs pour les thyristors moins élaborés équipant les engins moteurs à courant alternatif.

La figure 12 montre la forme de l'intensité dans les différentes parties du circuit du fait de l'incorporation du filtre. En ce qui concerne les perturbations engendrées dans les circuits de signalisation et de télécommunication par la caractéristique des courants qui passent dans le rail, la valeur de la fréquence retenue pour le fonctionnement du hacheur est de 300 hertz. A noter que l'augmentation de la fréquence permettrait de limiter la dimension du filtre (1) mais la technique même des thyristors impose un temps de conduction minimal (de l'ordre de 25 microsecondes) qui s'oppose donc à l'utilisation de fréquences élevées. Par suite un autre procédé est utilisé pour diminuer le dimensionnement du filtre qui consiste à augmenter artificiellement la fréquence du hachage en entrelaçant plusieurs hacheurs élémentaires qui fonctionnent à la fréquence f et débitent en parallèle sur le moteur **M** (figure 13). Le fonctionnement des hacheurs est décalé dans le temps (un tiers de période dans le cas de 3 hacheurs entrelacés). La figure 14 montre la forme du courant traversant les trois thyristors entrelacés (2)



- (1) A titre d'exemple et pour montrer l'intérêt de diminuer les dimensions du filtre
- sur les locomotives BB 7200. $C_o = 8 \text{ mf}$ pour un poids de 1200 kg
 - sur les locomotives B B 22 200 $C_o = 28 \text{ mf}$ pour un poids de 1 600 kg

(2) A noter que dans ce cas le temps maximal de conduction de chaque hacheur élémentaire est égal à $T = T/3$

- 6 - Problème posé par les basses tensions de démarrage.

Pour obtenir la tension de 8 volts aux bornes du moteur de 2200 kW lors du démarrage et une intensité de 400 ampères, le temps de conduction « T » du thyristor Th1 devrait être :

- la tension en ligne étant de 1 500 volts et la fréquence de fonctionnement « f » du hacheur étant de 300 Hz, la période $T = 1 / f = 1 / 300 = 3333$ microsecondes (μs)
 $T = T / 1500 \times 8 = 3333' / 1500 = 17 \mu s$

Or le temps de conduction minimal d'un thyristor étant de 25 μs et le temps de recharge du condensateur d'extinction d'environ 200 μs , on ne peut obtenir la tension de 8 volts avec une fréquence de fonctionnement de 300 hertz. D'où la nécessité d'adopter un certain nombre de fréquences sous-multiples de la fréquence de base (300 Hz) et compatibles (y compris leurs harmoniques) avec la signalisation; trois fréquences sont techniquement utilisables: F/3 soit 100 hertz, F/9 soit 33 hertz et F/27 soit 11 hertz,

Une autre solution peut être utilisée pour obtenir de basses fréquences lors du démarrage ; celle-ci, appelée «*hacheur vernier*», consiste à placer, en série avec le thyristor principal **Th1**, une résistance **R** qui fait chuter artificiellement la tension aux bornes du moteur permettant un temps de conduction de **Th1** suffisant pour permettre la charge du condensateur d'extinction, On fait varier la tension moyenne aux bornes du moteur en débloquant en temps opportun le thyristor **ThR** placé en parallèle sur la résistance **R**. (fig, 13). Lorsque le démarrage est obtenu **ThR** débloqué en permanence court-circuite la résistance de démarrage. Cette solution fut retenue lors de l'étude des éléments automoteurs électriques bicourant pour la SNCF (Z8100) et la RATP (MI 79) pour les lignes du métro (ligne de Sceaux) et de la banlieue parisienne (Cergy-Pontoise-Nanterre, Roissy-en-France-Gare du Nord, etc).

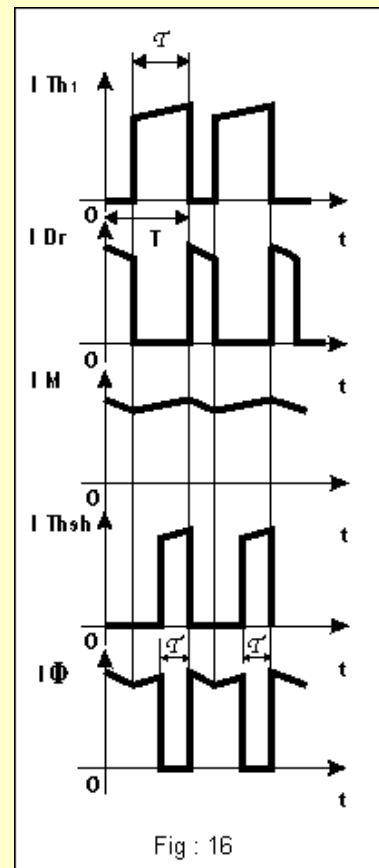
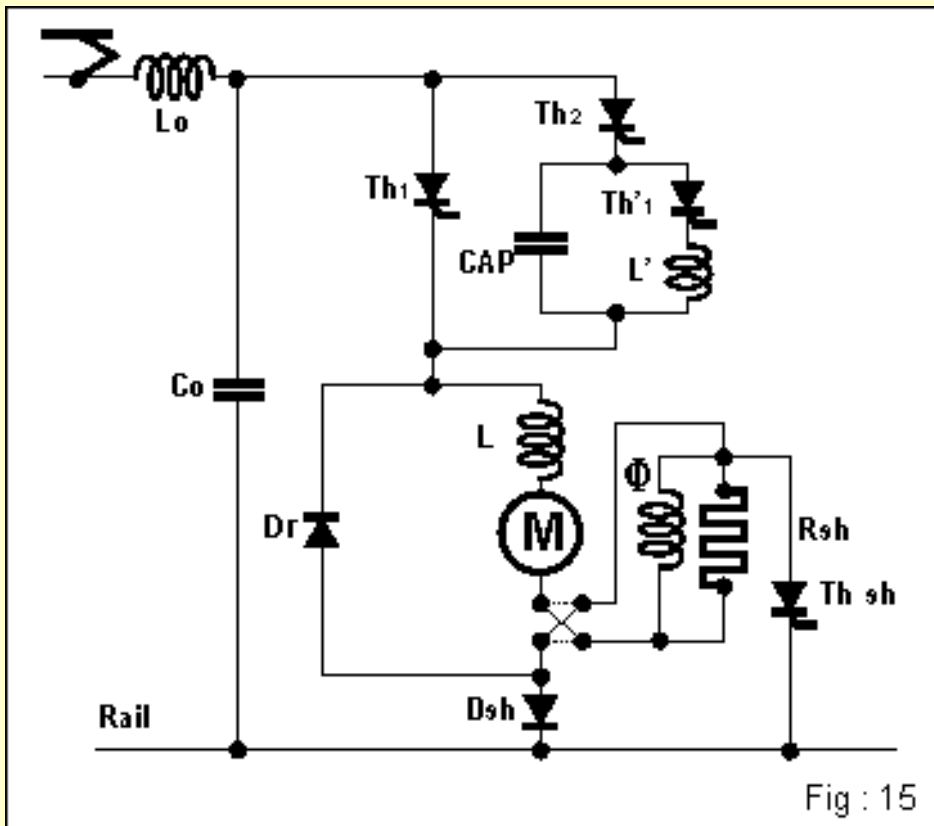


Rames RATP et SNCF

- 7 - Réglage du champ inducteur des moteurs de traction

Autrefois sur les locomotives à courant continu le réglage du champ inducteur des moteurs de traction était réalisé par court-circuitage d'un certain nombre de spires des inducteurs ou par shuntage de ceux-ci par des résistances. Sur les locomotives à hacheur, il est réalisé un réglage continu du champ inducteur des moteurs de traction (figure 15), Un thyristor **Th sh** est branché en parallèle sur l'inducteur du moteur **M**; l'allumage de **Th sh** permet d'écouler une partie de l'intensité qui traverse l'induit du moteur en dehors de l'inducteur (plus le temps de conduction « T' » du **Th sh** est important plus le taux de shuntage obtenu est important). Le thyristor de shuntage s'éteint en même temps que le thyristor principal **Th1**; en effet lorsque **Th1** s'éteint, l'intensité fournie par la self **L** ne peut emprunter le circuit du thyristor **Th sh** du fait de la présence de la diode **Dsh** et par suite **Th sh** s'éteint (1).

A noter sur la figure 15 la présence d'une résistance de shuntage permanent **Rsh** dont le rôle est d'écouler la composante alternative du courant ondulé qui traverse l'induit du moteur, la composante continue de ce courant traversant l'inducteur. Si on néglige l'intensité passant en permanence dans cette résistance (environ 10%), l'intensité traversant les différents points du circuit pour un temps de conduction « T » du thyristor principal **Th 1** et « T' » du thyristor de shuntage **Th sh** est représentée dans la figure 16.



- 8 - Freinage électrique

L'équipement à hacheur autorise le freinage électrique, soit rhéostatique, soit par récupération, Du fait de l'équipement des sous-stations des lignes électrifiées en courant continu qui ne permet que très rarement le freinage par récupération, seules les possibilités de schéma en freinage rhéostatique seront décrites ci-après. .. Depuis, les BB 7411 à 7440 freinent en RECUP sur la Maurienne (2), en Ile De France certains EAE (Z2N) font soit du Rhéostat soit de la Récupération (3) (de façon transparente pour le conducteur) selon les besoins d'énergie

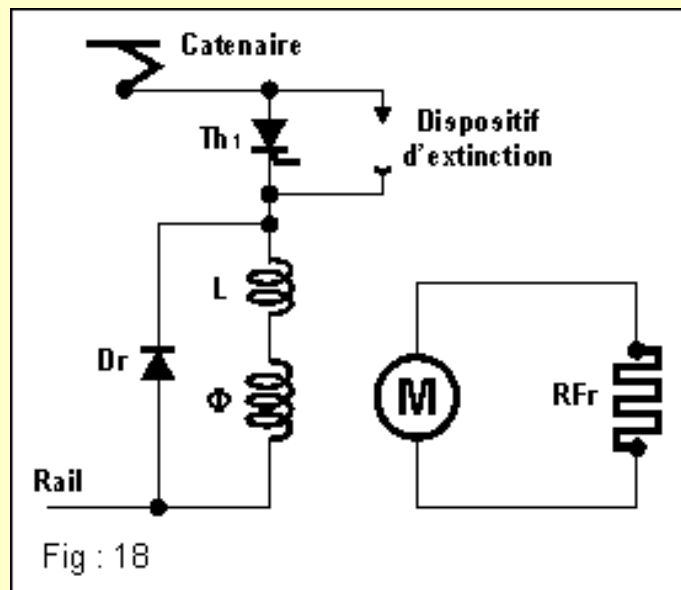
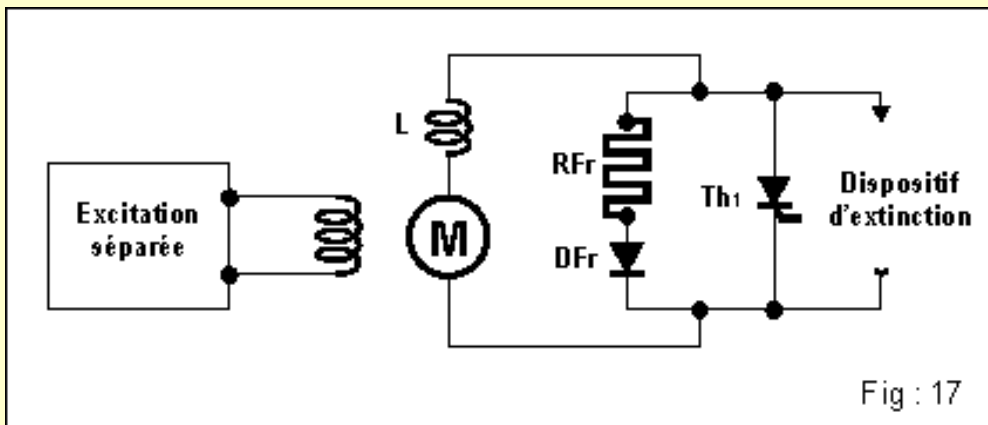
Deux schémas de principe peuvent être utilisés :

1°) Excitation constante -Variation de l'effort de retenue par variation du débit (figure 17) L'inducteur du moteur est alimenté par un dispositif d'excitation séparée et le hacheur principal Th1 est placé en parallèle sur la résistance de freinage **R_{Fr}**. Le déblocage judicieux de Th1 fait varier la résistance apparente de la résistance **R_{Fr}** depuis sa valeur maximale **R** (temps de conduction $T = 0$) jusqu'à une valeur pratiquement nulle ($T = T$).

2°) Excitation variable - Rhéostat de freinage à valeur constante (figure 18).

L'induit débite dans une résistance de freinage **R_{Fr}** de valeur constante. Le réglage de l'effort de retenue est réalisé en faisant varier le champ inducteur du moteur; cette variation est obtenue par le déblocage judicieux du hacheur principal Th1: champ nul si le temps de conduction T de Th1 = 0; champ maximal si $T = T$ par exemple.

- Le schéma montre que le hacheur ne peut jamais être déblocqué entièrement ($T = T$) en effet il serait impossible d'éteindre le thyristor de shuntage ce qui aurait pour conséquence de court-circuiter l'inducteur du moteur. De même t dans le cas de trois hacheurs entrelacés et pour les mêmes raisons: $T < T / 3$
- En freinage de maintien seulement.
- Avec priorité à la RECUP



- 9 - Protections d'un engin moteur à hacheur.

1°) Protection du matériel :

a) Compte tenu des temps extrêmement courts utilisés pour la commande d'un hacheur (temps de conduction maxi de l'ordre de 3 millisecondes) il est possible d'auto-protéger le circuit de puissance par extinction et blocage du hacheur correspondant. Ceci nécessite toutefois une détection ultra-rapide des défauts (dépassement de l'intensité par exemple); la solution retenue pour procéder aux différentes mesures (intensité, tension) consiste à utiliser des « sondes à effet HALL » dont le principe fait l'objet de l'annexe.

Toutefois en cas de défaut sur les circuits de commande ou de puissance du hacheur même, il pourrait être impossible d'obtenir l'extinction des thyristors principaux; par suite il est indispensable d'assurer la protection générale des circuits de puissance (et des auxiliaires) par un **disjoncteur ultra-rapide**. Le disjoncteur utilisé est du type **HRKS** équipant déjà un grand nombre de locomotives. Ce disjoncteur électropneumatique a subi quelques modifications afin de le rendre plus performant (*temps d'ouverture demandé: 2 millisecondes*), en particulier: (figure 19) ;

- la bobine de maintien est alimentée par un générateur délivrant une tension stabilisée (générateur ALMA : «Alimentation Matra» et sa valeur constante aux bornes de la bobine (30 volts~5 %) et par suite une fidélité de fonctionnement du disjoncteur appréciable ;
- indépendamment des dispositifs de protection agissant directement sur le circuit de la bobine de maintien du disjoncteur (relais différentiel **QD**, relais de surcharge) certains défauts nécessitent une détection et une action quasi instantanées, Pour cela :
 - la détection est assurée par des sondes à effet Hall : le disjoncteur comporte une bobine de déclenchement ultra-rapide **DT DJ**, incorporée dans le disjoncteur et placée sur la même armature magnétique que la bobine de maintien mais fournissant un flux antagoniste à celui engendré par cette bobine. La figure 18 montre qu'en

cas de défaut sur un circuit, l'information fournie par la sonde à effet Hall puis amplifiée, a pour effet d'alimenter le primaire d'un transformateur **TFDTDJ** dont le secondaire commande le déblocage du thyristor **Th DT DJ**, Le relais **QDT DJ** étant alimenté en permanence, ses contacts sont fermés et par suite, la bobine de déclenchement **DT DJ** est alimentée, produisant un flux antagoniste à celui engendré par la bobine de maintien et accélérant ainsi le processus d'ouverture du disjoncteur. Toutefois il est nécessaire de désexciter ensuite la bobine de déclenchement afin d'autoriser un essai de fermeture du disjoncteur. Compte tenu de la résistance des différents appareils constituant le circuit (**RQ DT DJ**, **Q DT DJ** et **DT DJ**) lorsque le thyristor **Th DT DJ** est «*passant*», la tension aux bornes de la bobine **QDT DJ** a tendance à chuter brutalement et à devenir insuffisante pour maintenir ses contacts. Toutefois afin de garantir un temps d'excitation suffisant de **DT DJ** et, par suite, l'ouverture du disjoncteur, une capacité **CAP DT DJ** assure, en se déchargeant dans la bobine du relais **QDT DJ**, la temporisation nécessaire.

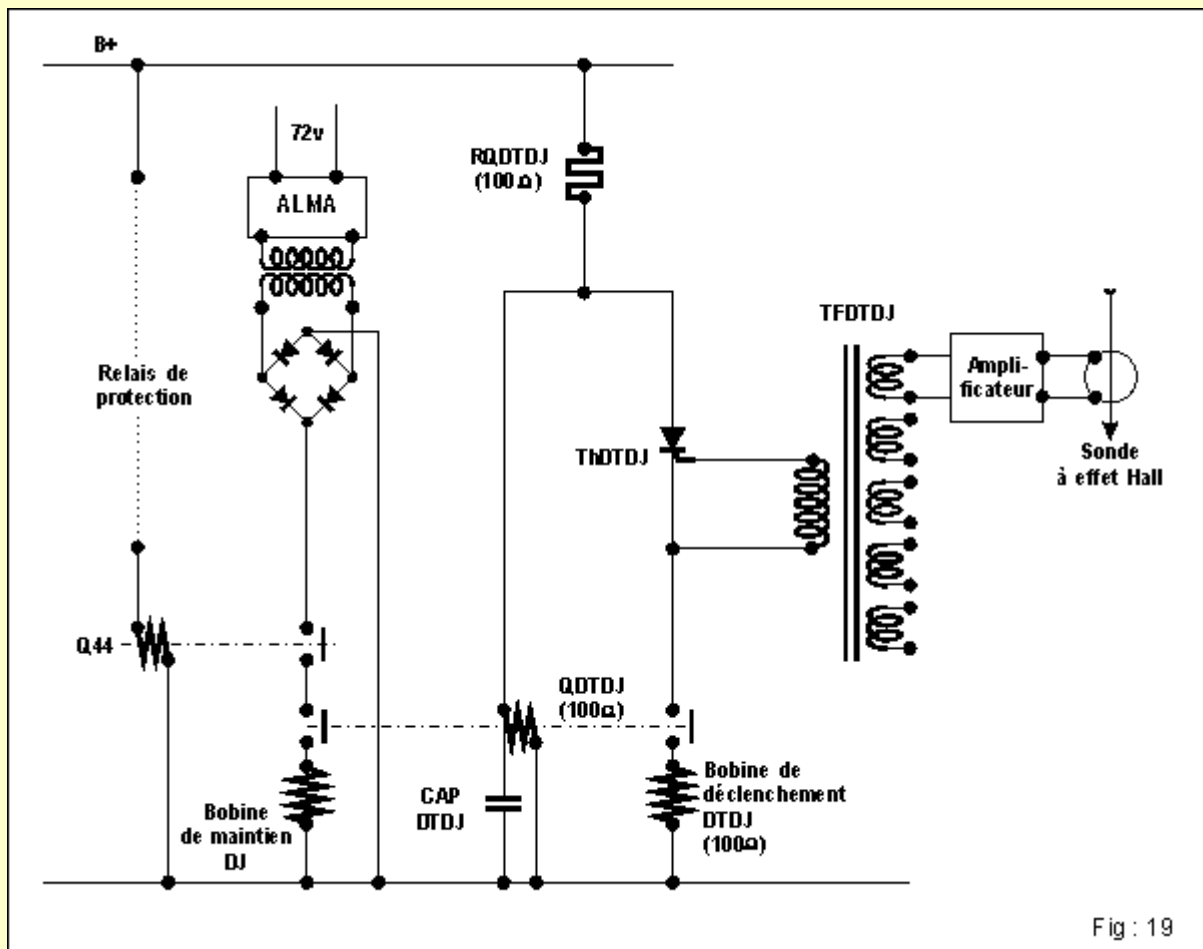


Fig : 19

b) le filtre est un élément favorable pour la protection du hacheur contre les surtensions rencontrées en ligne et provenant de causes diverses (ouverture en charge de disjoncteurs, fusion de fusibles,...); il permet en effet par la présence de la self et de la capacité « d'amortir » ces surtensions (figure 20). Par contre l'arrêt accidentel et brutal du hacheur peut entraîner, par oscillation du circuit **Lo Co** (avant ouverture du disjoncteur) des surtensions aux bornes du hacheur; en effet à un instant donné la capacité C_0 et la sous-station forment un circuit comportant deux générateurs en série et par suite, la tension appliquée à l'entrée de **Th1** est égale à la somme des tensions délivrées par ces générateurs.

Pour assurer la protection du hacheur contre les surtensions un dispositif « écrêteur » limite la tension à une valeur acceptable (figure 20) ; la conduction du thyristor **ThE** permet d'écouler la charge de la capacité C_0 du filtre, la résistance **RE** limitant l'intensité de décharge et le relais **QE** commandant l'ouverture du disjoncteur.

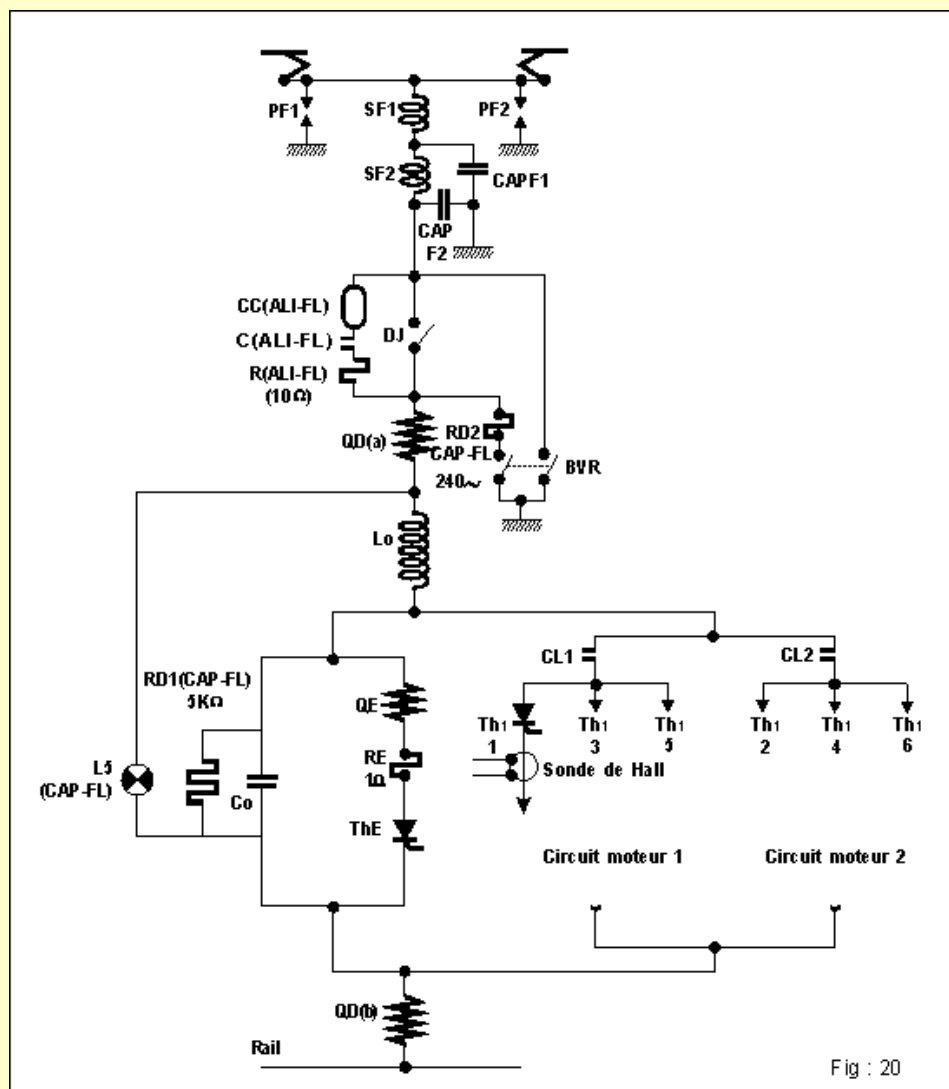
c) une résistance **RD 1 (CAP-FL)** de 5000 ohms, branchée aux bornes de la capacité C_0 permet la décharge lente de cette capacité (**40 secondes environ**) lorsque le disjoncteur est ouvert. Par suite, après un stationnement, la capacité étant déchargée, la fermeture du disjoncteur reviendrait à mettre la sous-station en court-circuit (1) ; en conséquence :

- la fermeture du disjoncteur est assujettie à la charge préalable de **Co** (pas d'alimentation du relais **Q44** et par suite de la bobine de maintien du disjoncteur si la capacité n'est pas chargée)
- la fermeture d'un contacteur **C (ALI-FL)** autorise la charge de **Co** avant la fermeture du DJ; une résistance de 10 ohms **R (ALI-FL)** délimite l'intensité et le temps (**environ 1/10 seconde**) de charge.

La résistance des bobinages du circuit (SF 1 et 2, GD, Lo) est à considérer comme négligeable.

d) deux parafoudres **PF 1 et 2** protègent l'ensemble des circuits contre les surtensions d'origine atmosphérique,

e) un filtre Haute Fréquence, constitué de deux selfs **SF 1 et 2** et deux condensateurs **CAP F 1 et 2**, permet de limiter les perturbations radiophoniques engendrées par le hacheur.



2°) Protection du personnel.

Indépendamment des mesures de protection du personnel prises sur les autres engins moteurs, la présence de la capacité **Co** du filtre nécessite la mise en place d'une sécurité supplémentaire. En effet il est indispensable que cette capacité soit déchargée avant que le personnel puisse accéder aux compartiments haute tension; pour ce faire :

- la manœuvre de la boîte de verrouillage « **BVR** » provoque la mise à la terre de la capacité **Co** par l'intermédiaire d'une résistance **RO2 (CAP-FL)** fixant l'intensité et le temps de décharge (*de l'ordre de 2 secondes*) ;
- l'extinction d'une lampe de signalisation **LS (CAP-FL)** placée à proximité de la boîte de verrouillage, indique que la capacité est déchargée,

- 10 - Conduite d'un engin moteur à hacheur de courant.

Nous avons vu précédemment que l'obtention du temps de conduction variable du hacheur permettait de faire varier de 0 à U_{max} la tension moyenne aux bornes du moteur et en conséquence d'obtenir les différents efforts moteurs nécessaires pour la remorque d'un train. Or la commande directe du temps de conduction du hacheur exigerait une surveillance permanente des ampèremètres et toute fausse manœuvre entraînerait le dépassement de l'intensité admissible et le fonctionnement des dispositifs de protection. (c'est cette contrainte qui justifie les règles **très strictes** d'utilisation, en application du guide de dépannage, lors de la commande secours-traction sur les BB7200).

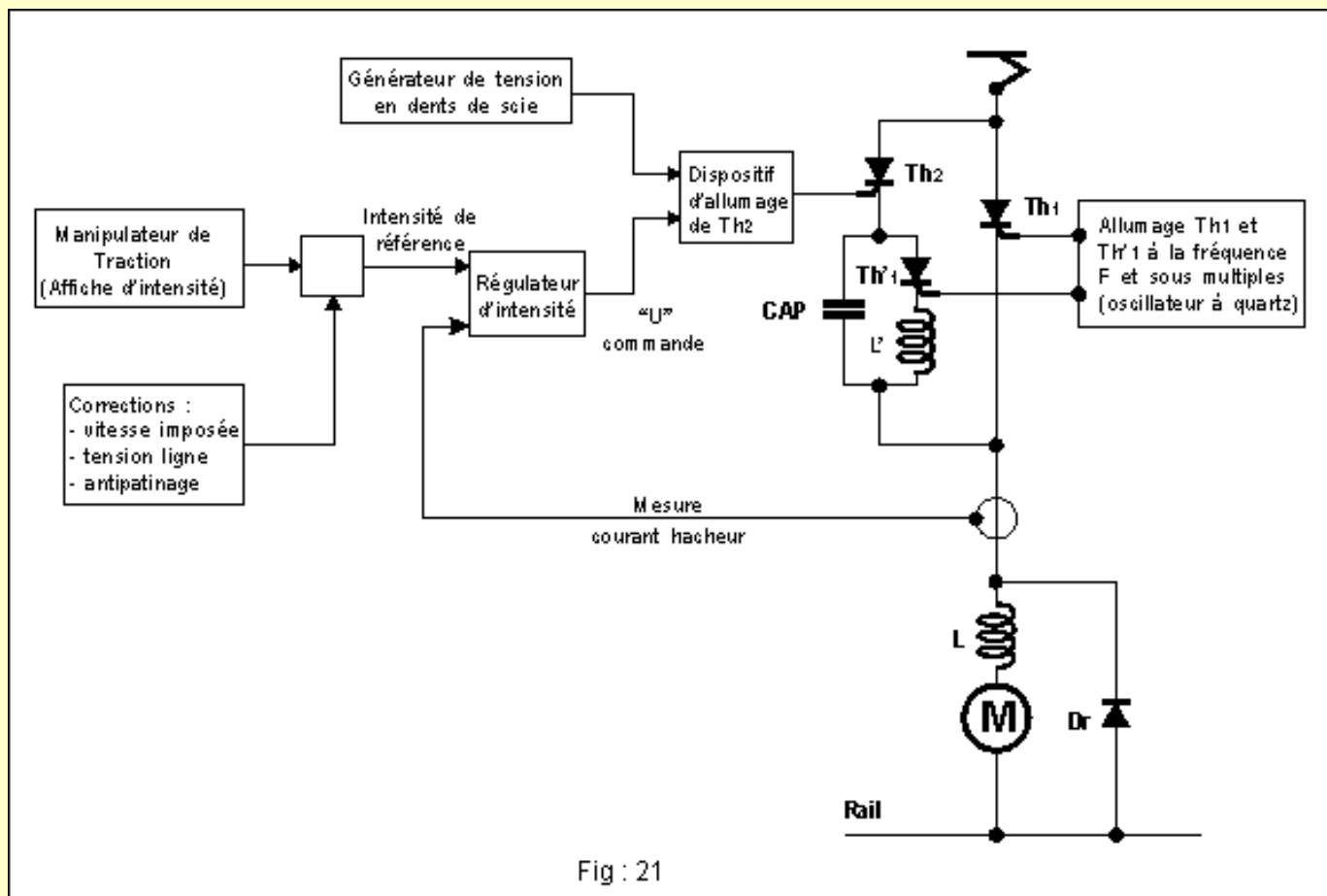


Fig : 21

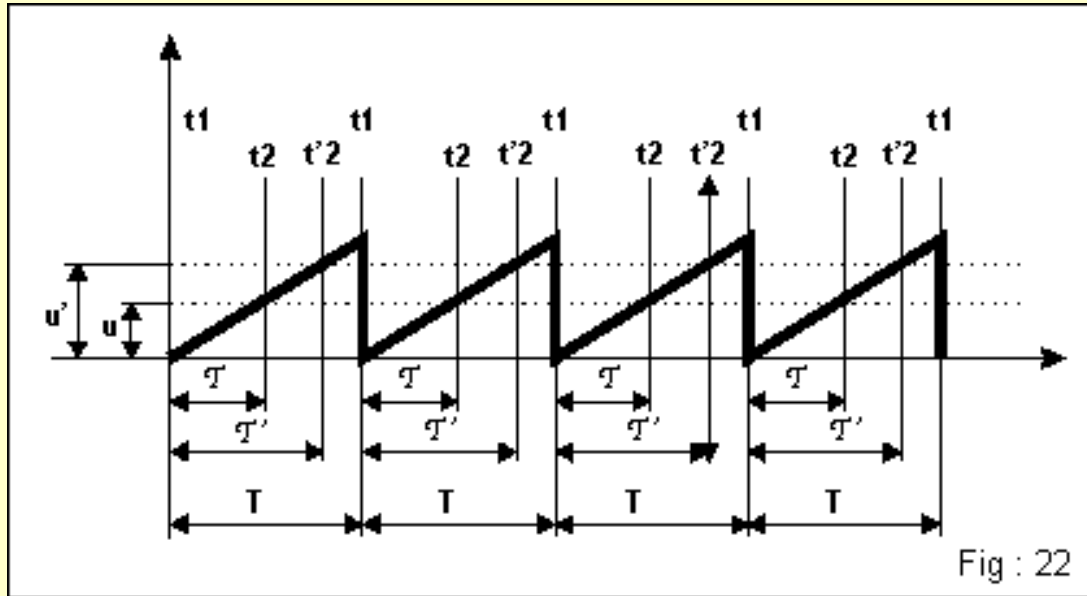
Pour libérer le mécanicien d'une telle surveillance le fonctionnement des hacheurs est « piloté » par un régulateur d'intensité; le principe de la commande d'un engin à hacheur est alors le suivant (figure 21) :

- le mécanicien à l'aide du manipulateur de traction détermine une « intensité d'affiche » et, par suite, un effort à la jante; à chaque position du manipulateur correspond une intensité d'affiche. Cette intensité peut recevoir des correctifs de la part de dispositifs automatiques tenant compte de divers paramètres en particulier :
 - *le dispositif de vitesse imposée (VI)* sur les engins équipés de ce dispositif, lorsque la vitesse du train tend à atteindre la vitesse affichée par le mécanicien, le dispositif de VI agit automatiquement afin de diminuer (et annuler si nécessaire) l'intensité d'affiche ;
 - *la valeur de la tension en ligne*; toute diminution instantanée de la tension aux bornes du circuit de traction (défaillance de l'alimentation HT ou mauvaise captation due à un décollement du pantographe ou à la présence de givre sur les fils de contact) ayant pour effet de diminuer l'intensité traversant ce circuit, celle-ci devient inférieure à l'intensité d'affiche et le dispositif de commande tend à augmenter le temps de conduction du hacheur. Lorsque la tension revient à sa valeur normale, l'intensité aurait tendance à augmenter brutalement provoquant le fonctionnement des sécurités; pour éviter cela un dispositif spécial « ajuste » à tout instant le courant d'affiche et la tension aux bornes du circuit de traction.
 - *le dispositif d'antipatinage*; si un patinage est détecté par ce dispositif, celui-ci agit automatiquement afin de diminuer brutalement l'intensité affichée par le mécanicien. Lorsque le patinage cesse ce même dispositif permet l'augmentation progressive de l'intensité jusqu'à la valeur initiale affichée.

L'intensité résultant de celle affichée par le mécanicien et corrigée, le cas échéant, par les dispositifs ci-dessus est appelée « **Intensité de référence** » ;

- une « mesure de courant » permet de contrôler à tout instant l'intensité du courant parcourant le circuit du hacheur ;

- un « régulateur d'intensité » compare l'intensité de référence avec l'intensité mesurée au hacheur. A partir de cette comparaison il élabore une tension de commande « u » telle que :
 - si l'intensité du hacheur est supérieure à l'intensité de référence, « u » diminue,
 - si l'intensité du hacheur est inférieure à l'intensité de référence, « u » augmente ;
- le fonctionnement correct d'un hacheur nécessitant une fréquence de fonctionnement très précise, l'allumage de Th1 est assuré par un oscillateur à quartz qui permet d'obtenir avec précision la fréquence de base (f) de 300 hertz (et ses sous-multiples pour l'obtention des basses tensions nécessaires au démarrage) et, par suite, la période de fonctionnement du hacheur ($T = 1 / f$)
- le réglage du temps de conduction T , qui détermine finalement la valeur de la tension moyenne appliquée au moteur, est obtenu en décalant de façon convenable, l'instant d'extinction du thyristor principal **Th1** par rapport à son instant d'allumage suivant le principe de fonctionnement suivant (figure 22) :



t_1 : allumage de de Th1 (et de Th'1),
 $t_2, t'2$: allumage de de Th2, extinction de Th1,
 (t_2-t_1) $(t'2-t_1)$ temps de conduction T du hacheur Th1

- l'allumage de **Th1** est provoqué à l'instant t_1 ; début de la période T , et ceci suivant la fréquence « f » de fonctionnement du hacheur,
 - au même instant t_1 et à la même fréquence de fonctionnement que le hacheur, un générateur élabore une tension en dents de scie de caractéristique constante,
 - un dispositif compare à chaque instant la tension en dents de scie et la tension de commande « u » qui, rappelons-le, est proportionnelle à l'intensité de référence,
 - lorsque la tension en dents de scie a même valeur que la tension de commande (instant t_2 , une impulsion est appliquée à la gâchette du thyristor d'extinction **Th2**. L'intervalle de temps $t_2 - t_1$ détermine donc le temps de conduction T .
- La figure 22 montre que :
 - si la tension de commande augmente, l'instant t_2 est reculé ($t'2$), le temps de conduction augmente (T' et par suite la tension moyenne aux bornes du moteur augmente ;
 - inversement si la tension de commande diminue, l'instant t_2 est avancé, le temps de conduction diminue et par suite la tension moyenne aux bornes de moteur diminue.
 - Lorsque la tension maximale est obtenue aux bornes du moteur, le shuntage continu de ses inducteurs est mis en action automatiquement (pas de manette de shuntage).

Nota: Avec le système de régulation utilisé (affichage d'intensité), si un essieu patine, la force contre électromotrice du moteur lié mécaniquement à cet essieu augmentant, l'intensité a tendance à diminuer: le système de régulation tend à maintenir l'intensité affichée et par suite à amplifier le phénomène d'emballement. Seul le dispositif d'antipatinage permet, comme on l'a vu ci-dessus, de diminuer automatiquement l'intensité de référence. Toutefois, afin d'éviter la mise en survitesse d'un moteur en cas de mauvais fonctionnement du dispositif d'antipatinage, il a été nécessaire de mettre en place un relais de survitesse agissant sur la chaîne de maintien du disjoncteur.

- 11 - Avantages des engins moteurs, à hacheur.

1°) La propriété du hacheur fonctionnant en transformateur est très appréciable au cours des démarrages. En effet, sur une locomotive traditionnelle l'intensité est limitée par les possibilités du rhéostat et celles du captage dont la qualité se dégrade pour des intensités supérieures à 4000 ampères alors que, sur une locomotive à hacheur, la seule limitation est celle imposée par le captage. Or cette dernière ne se trouve atteinte qu'à la fin de la période de mise en vitesse (tension aux bornes du moteur ~ tension en ligne, c'est-à-dire lorsque le rapport de transformation est pratiquement égal à 1).

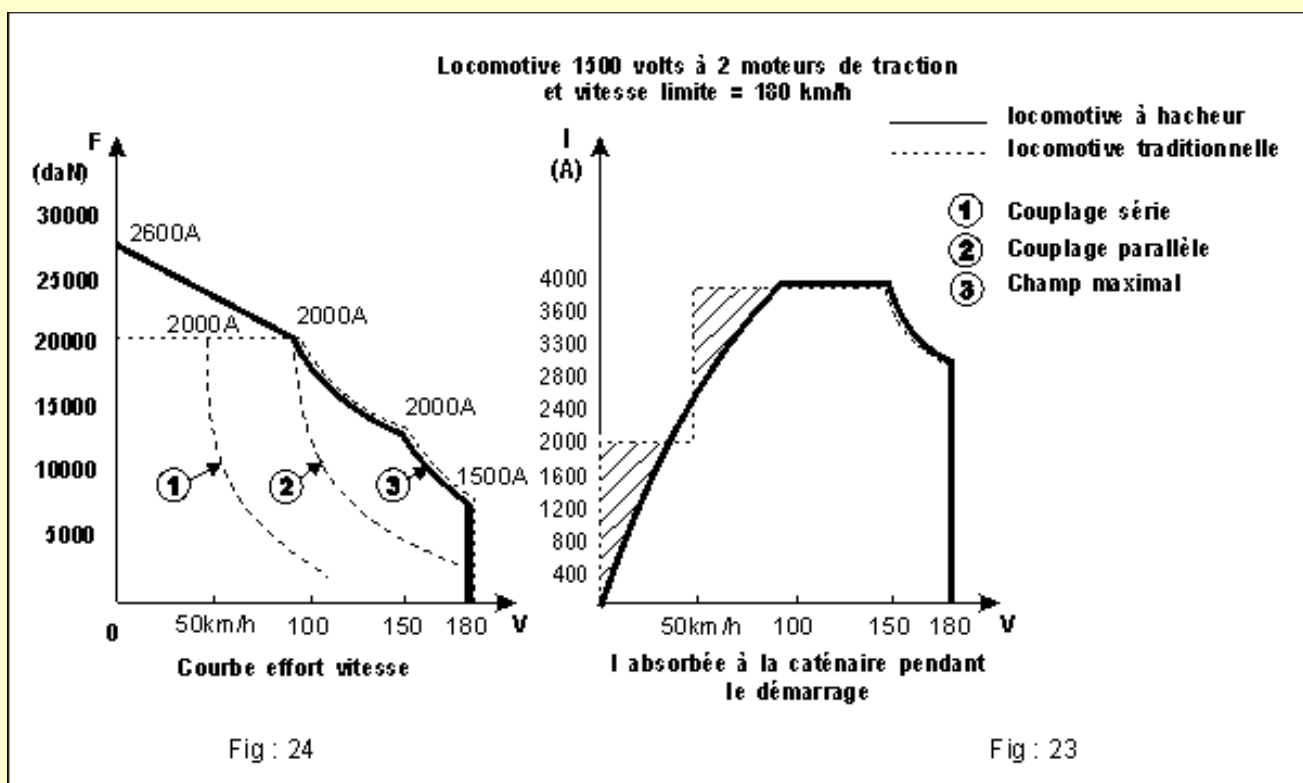
Cette propriété permet d'accepter, pendant les démarrages, une surcharge égale à **1,7 fois** l'intensité du régime continu.

Par ailleurs, les sous-stations n'ayant plus à fournir que la puissance absorbée par les moteurs de traction (plus de puissance dissipée en chaleur dans un rhéostat), les possibilités, offertes pour le démarrage simultané de plusieurs trains dans un même secteur électrique, sont accrues. (figure 23).

2°) Les pertes dans le rhéostat étant supprimées il en résulte une économie d'énergie qui est appréciable dans le cas de trains à démarrages fréquents (en particulier pour des automotrices de banlieue).

3°) La conduite d'une locomotive à hacheur est identique à celle d'une locomotive monophasée à thyristors, c'est-à-dire que toutes les positions du manipulateur de traction correspondent à des points de fonctionnement pouvant être utilisés en permanence (infinité de « crans de marche économique » dans le plan effort-vitesse de la figure 24).

4°) La locomotive à hacheur se prête à l'utilisation de dispositifs automatiques; en particulier l'application d'un dispositif de vitesse-imposée (VI) ne pose aucun problème.



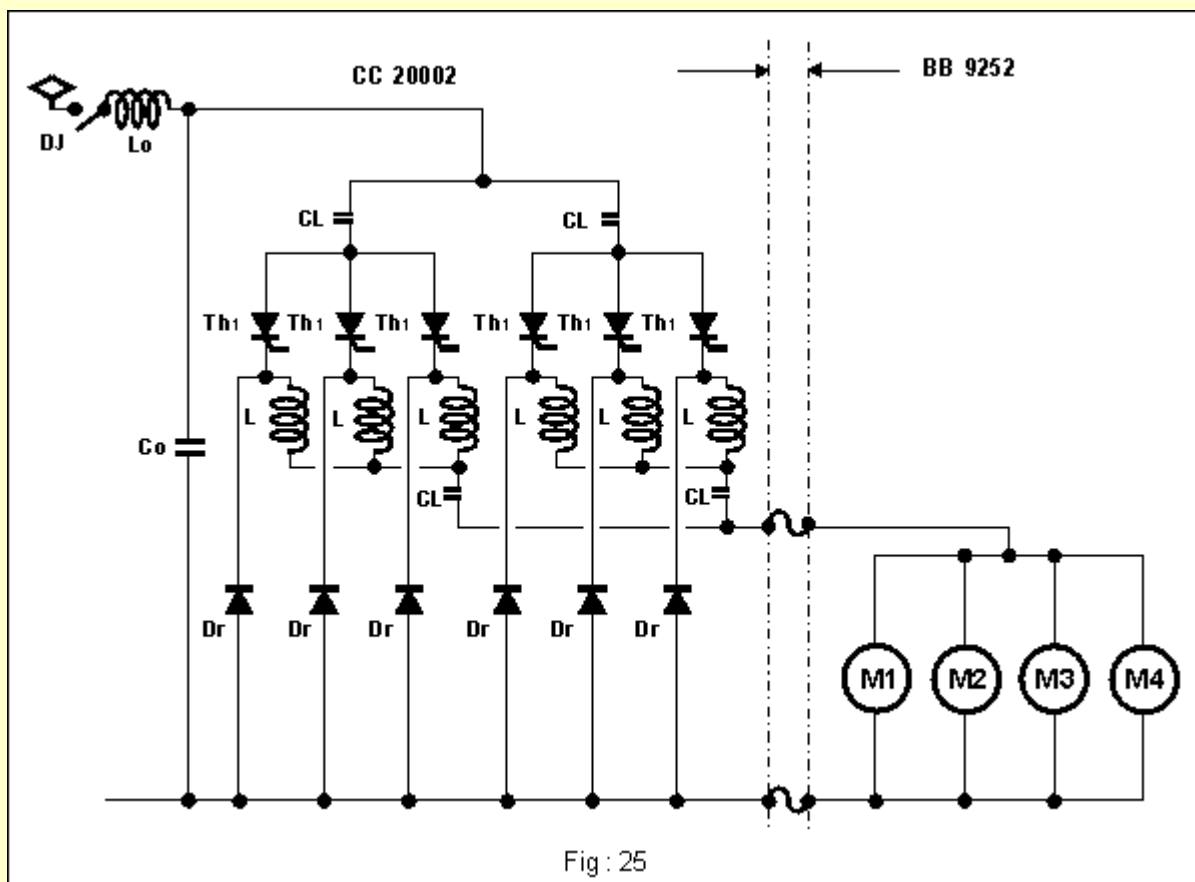
- 12 - Historique des réalisations effectuées par la SNCF dans le domaine des hacheurs de courant.

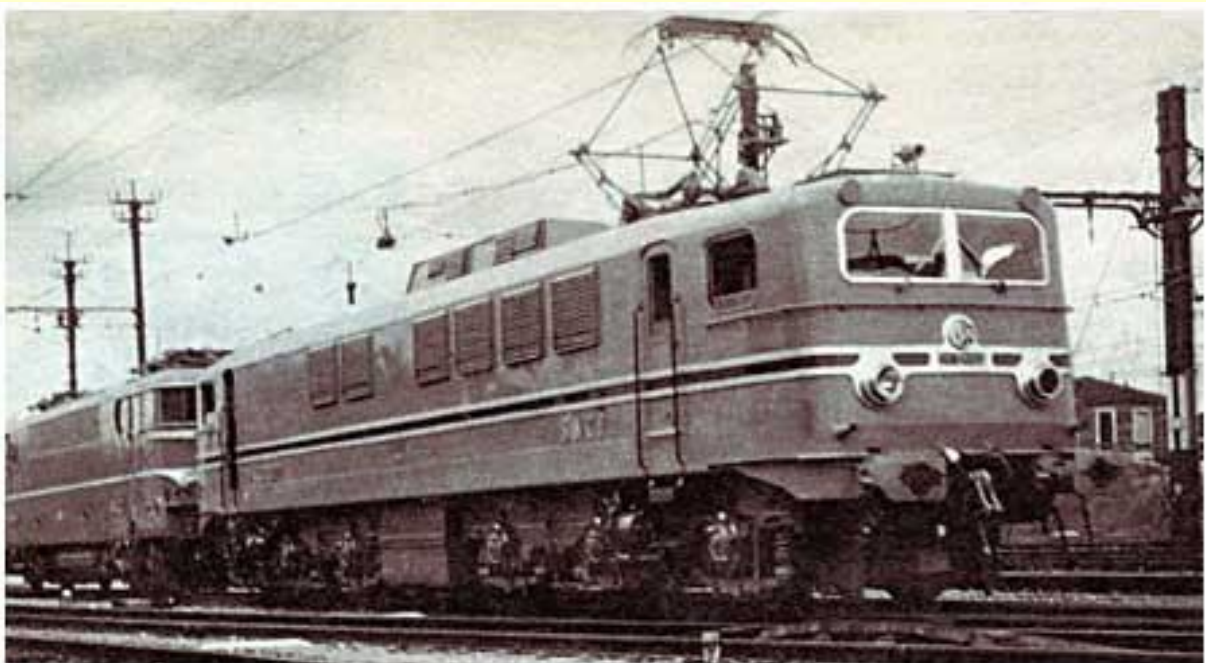
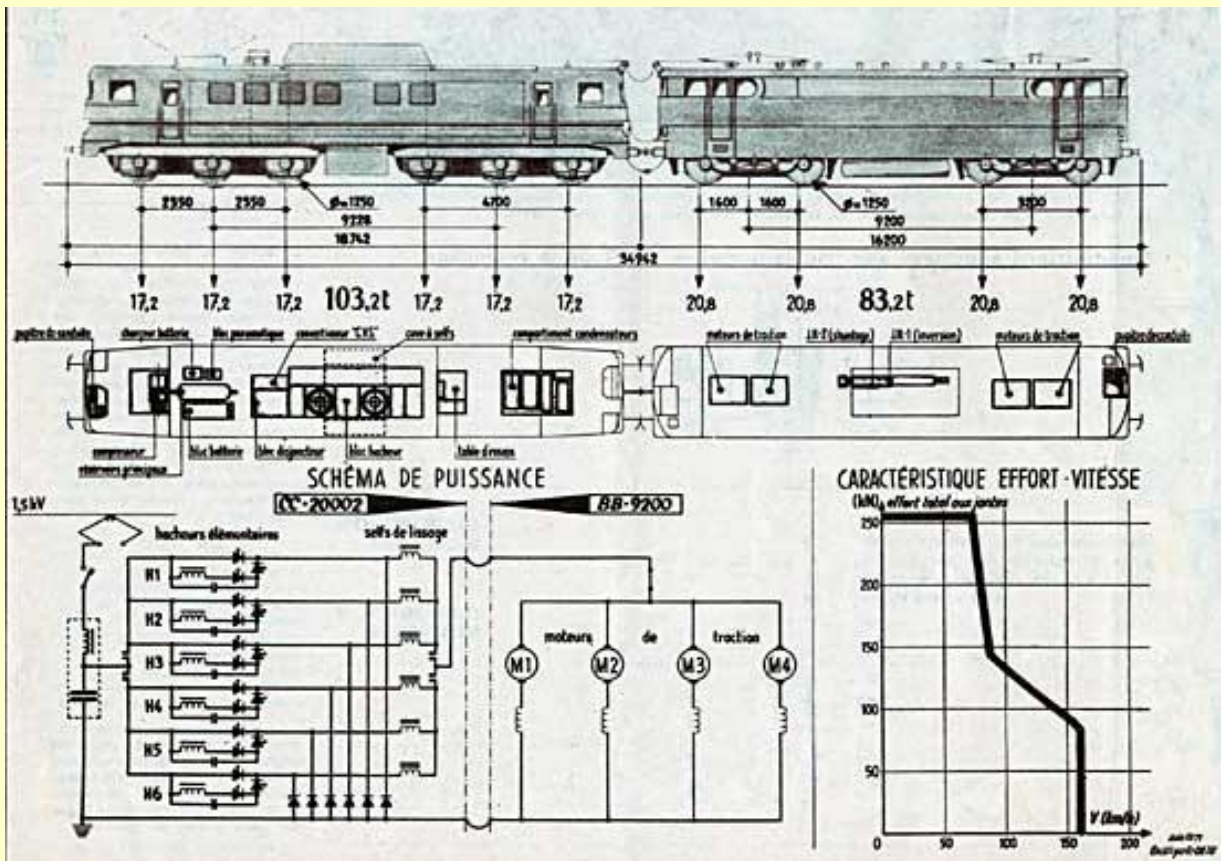
A partir de 1965 les premières expérimentations et mises en service de hacheurs 1 500 volts de faible puissance sont effectuées :

- hacheur de 2 kW destiné à assurer la charge de la batterie d'accumulateurs sur des locomotives BB 9200,
- hacheur de 20 kW destiné à assurer la charge des batteries 72 volts et 30 volts et l'excitation des moteurs de traction lors de la marche en freinage rhéostatique (CC 6500 et CC 21000).

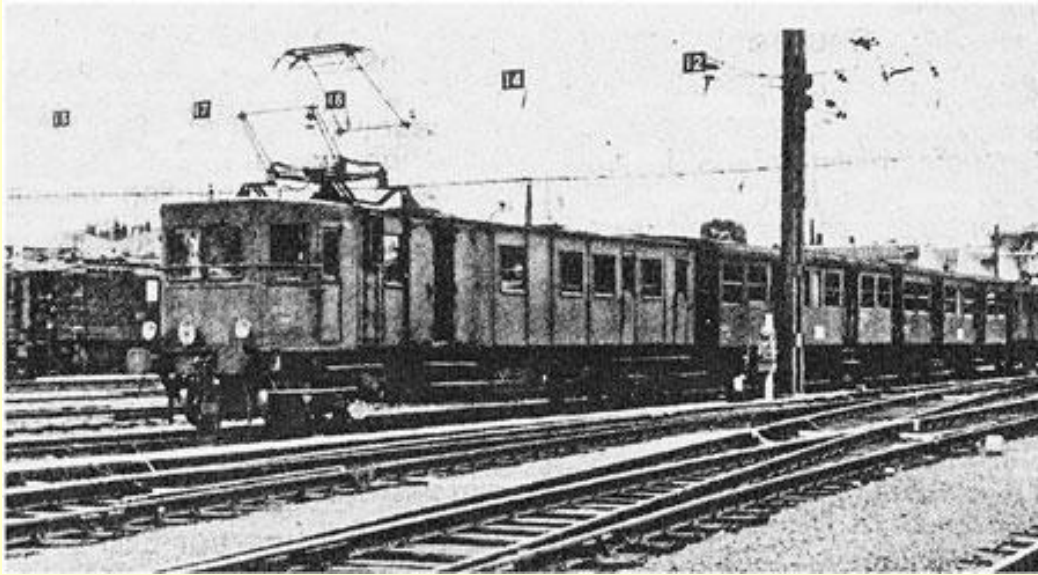
- En 1966, montage d'un hacheur de 40 kW alimentant, sous tension réglable, les deux groupes moteurs ventilateurs de traction montés en série d'une locomotive BB 9200 (9283),
- En 1968, équipement de quatre engins moteurs 1 500 volts: Z 4001 et 4002, Z 4203 (hacheur de 600 kW pouvant fonctionner en freinage rhéostatique et en freinage par récupération) et locomotive BB 17 (hacheur de 1200 kW)
- En 1971, un hacheur de 4400 kW est installé sur la locomotive CC 20002 (ancienne locomotive à moteurs monophasés à collecteurs) ; ce hacheur alimente les quatre moteurs de traction de la locomotive BB 9252 qui lui est accouplée en permanence.

La figure 25 ci-jointe donne le principe du schéma de puissance de ce couplage; à noter les 2 groupes de 3 hacheurs entrelacés.





Couplage CC20002 + BB9252 (Documents de la vie du Rail n°1350 de 1972)



Z4001 assurant une navette de service à Toulouse en 1964

(LVDR du 14 mars 1985)

En 1974:

- une automotrice Z 7001 a été équipée d'un hacheur d'une puissance d'environ 2000 kW (éléments en provenance de la CC 20002) afin de tester un nouveau type de bogie (Y 226) à grande vitesse et effectuer diverses autres expérimentations (frein à courant de Foucault,...). L'équipement comprend 3 hacheurs élémentaires entrelacés alimentant, sous la tension maximale de 1 000 volts, quatre moteurs de traction branchés en parallèle (*moteurs identiques à ceux montés sur la rame expérimentale à turbines «TGV 001 »*). La figure 26 donne le principe du schéma de puissance de cet engin moteur; à noter les enroulements des patins de frein à courants de Foucault (FEM 1 à 4) qui sont alimentés deux à deux (par bogie) en série par le générateur constitué par l'un des moteurs de traction du bogie correspondant (excitation séparée). La Z7001 (appelée ZEBULON), avait surtout pour but de tester la transmission tripode des TGV.
- une locomotive BB 15000 (15007) du dépôt de Strasbourg fut équipée, par les ateliers d'Hellemmes, d'un ensemble hacheur de 4400 kW suivant le schéma de puissance faisant l'objet de la figure 27 ci-jointe. Cette locomotive baptisée BB 7003, constitua le prototype des locomotives à hacheurs de la série BB 7200 commandées en 1974. Mise en service au cours du dernier trimestre 1974 elle effectua de nombreux essais sur les réseaux SUD-EST et SUD-OUEST.

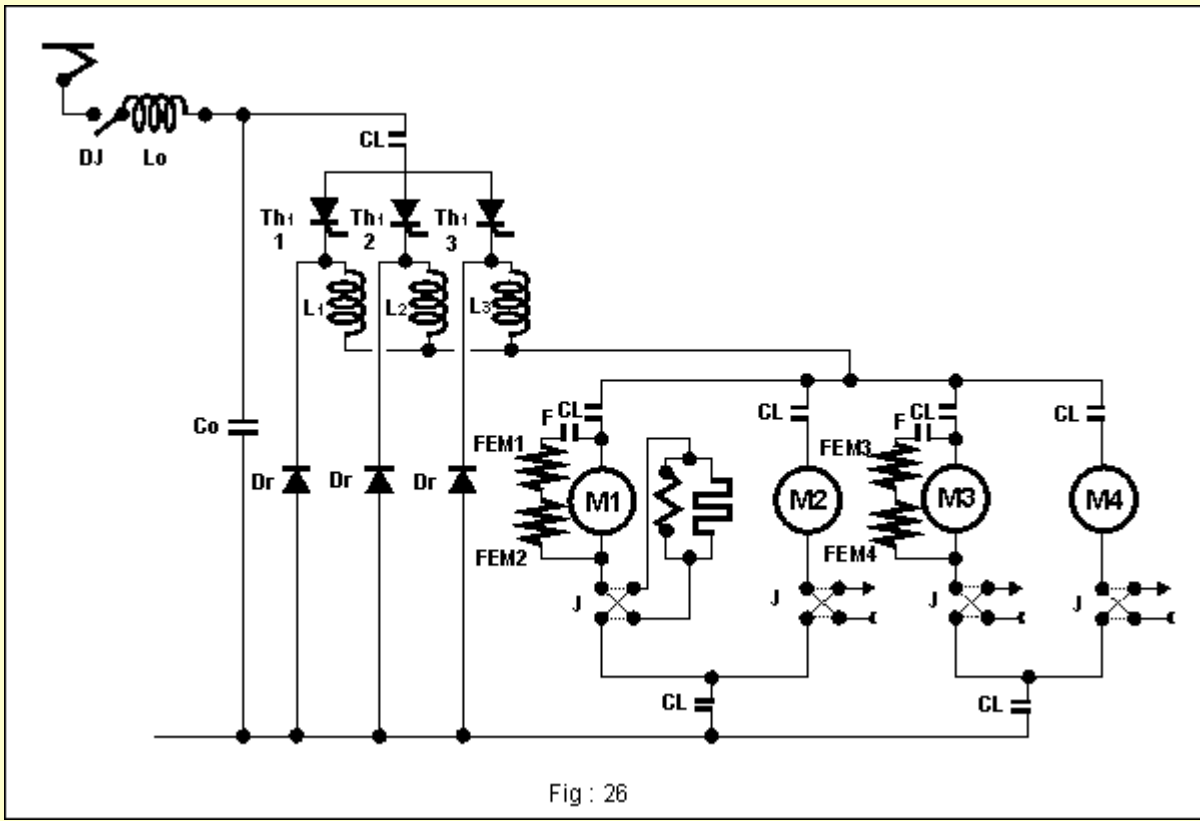


Fig : 26



BB 9200



BB 25100



BB 15000



Z 7001

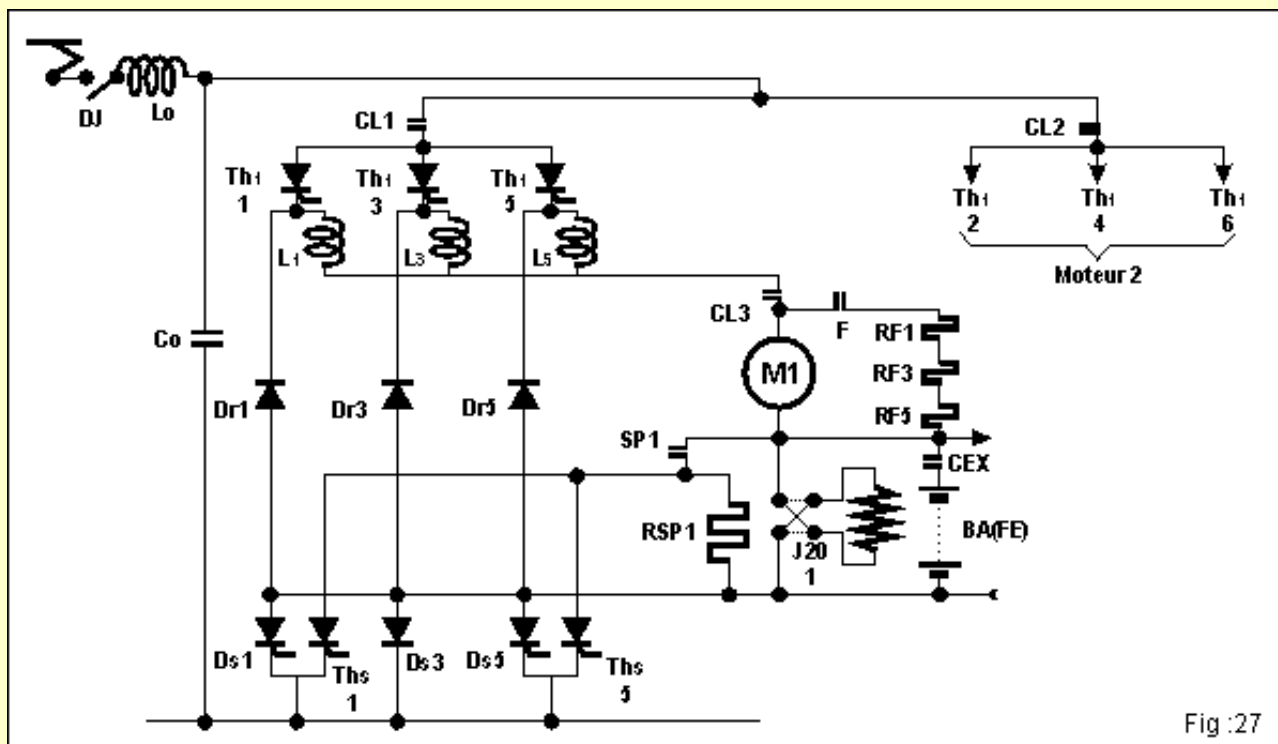


Fig :27

A noter que :

- Le freinage électrique est un freinage rhéostatique à excitation séparée variable, l'alimentation des inducteurs des moteurs étant réalisée par l'intermédiaire des thyristors principaux : Th 1, Th3,.....
- compte tenu du taux de shuntage à obtenir (environ 66 %) et afin d'économiser des semi-conducteurs de puissance, seuls deux hacheurs élémentaires sur trois de chaque moteur comportent un thyristor de shuntage.
- Au cours de l'année 1976, les deux premières séries de locomotives à hacheur de courant seront mises en circulation à la SNCF :
 - au cours du premier trimestre, sortie de la BB 7201 dont le principe du schéma de puissance fait l'objet de la figure 27 (schéma identique à la BB 7003). Les locomotives de ce type furent d'abord affectées au Réseau du SUD-EST.
- Au cours du troisième trimestre, sortie de la BB 22201, locomotive bicourant 1500 volts continu, 25000 volts 50 Hz alternatif dont le principe du schéma de puissance fait l'objet de la figure 28. Cette figure montre que le schéma de base retenu est celui de la BB 7200, les hacheurs étant alimentés, soit directement par la caténaire en 1500 volts continu, soit par l'intermédiaire d'un ensemble transformateur à rapport fixe-pont de redresseurs en courant alternatif.



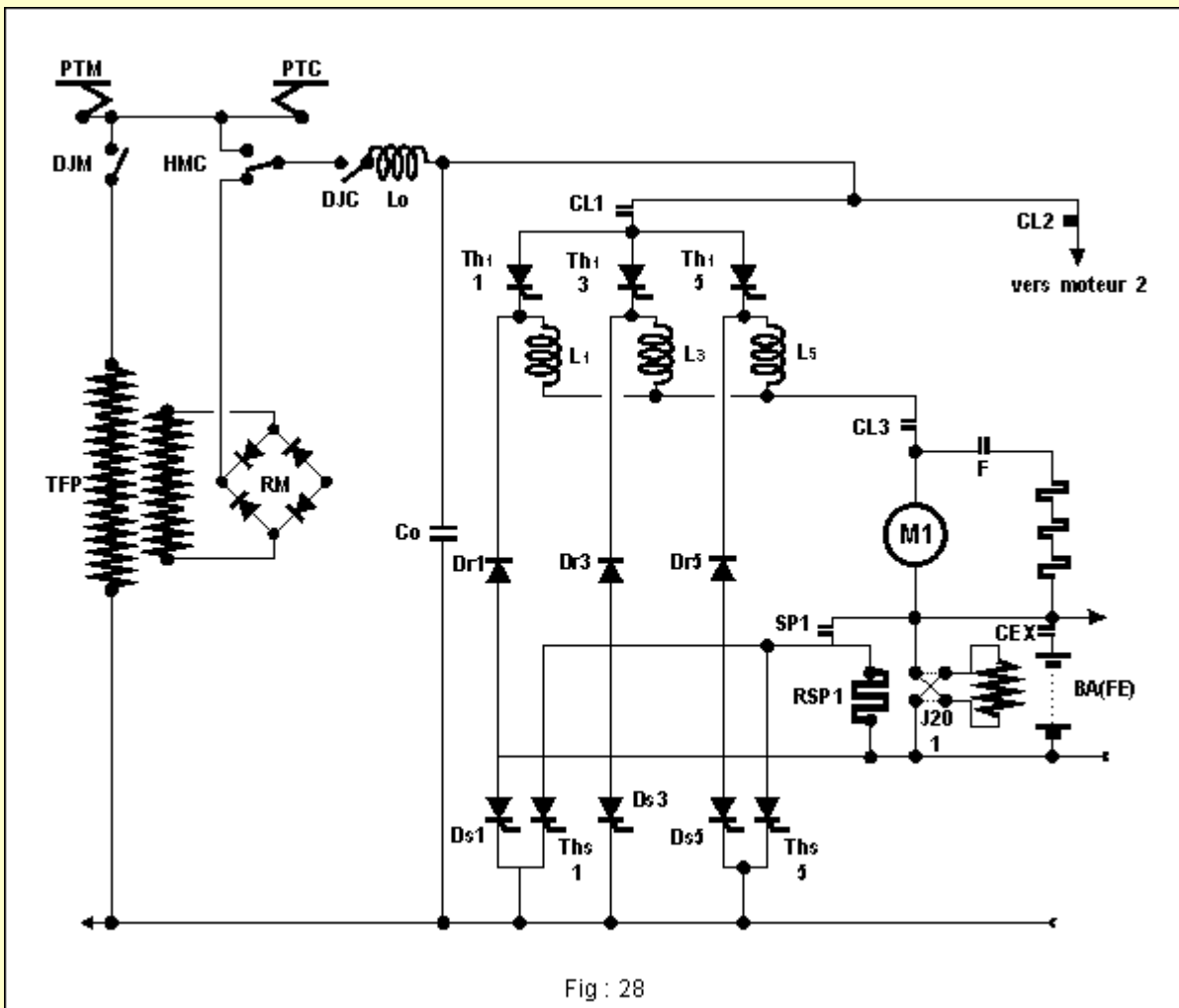
BB 7201 à 7440



BB 22201 à 22405

Les locomotives de ce type furent affectées aux Réseaux OUEST et SUD-EST.

- Vers 1980 apparaissaient deux nouveaux types de matériel utilisant les hacheurs de courant:
 - d'une part les T.G.V, circulant sur la ligne nouvelle Paris-Lyon,
 - d'autre part, les éléments automoteurs circulant sur lignes de l'Ile De France du type Z2N.





Rame Z2N



TGV PSE