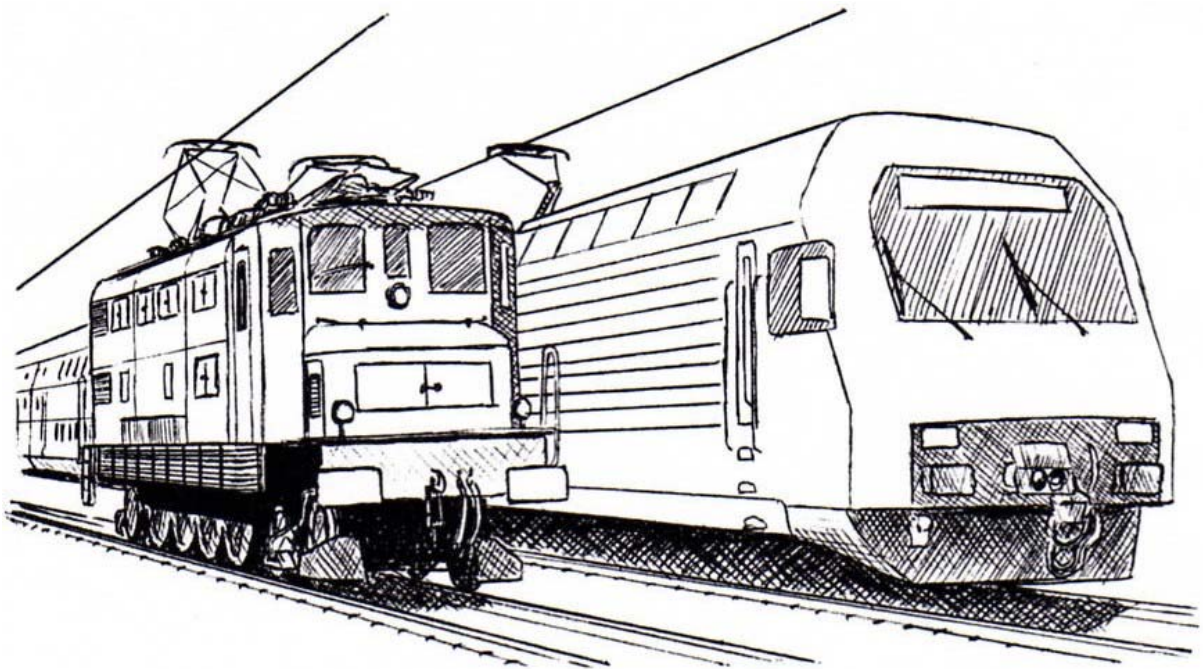


# Techniques Ferroviaires



Jean-Marc Allenbach



Laboratoire de Machines Electriques

Edition 2013



## 1.1 Introduction

Le chemin de fer existait déjà depuis longtemps lorsqu'apparut la traction électrique. C'est cependant celle-ci qui lui permit de connaître le large développement qu'il a atteint maintenant :

- Augmentation des charges de trains.
- Augmentation des vitesses et des accélérations conduisant à une réduction des temps de trajet.

Comparée à une locomotive à vapeur, puis à la locomotive diesel de même masse, non seulement une locomotive électrique dispose d'une puissance nominale bien plus élevée, mais aussi elle peut développer pendant un temps court une puissance encore plus grande, de 50 % à 100 % supérieure. Cette propriété de la locomotive électrique justifie les lourds investissements en électrification dès que le trafic devient important sur une ligne, reléguant le diesel –successeur de la vapeur – aux lignes à trafic faible voire sporadique.

## 1.2 Introduction à la deuxième édition

Durant cette dernière décennie, des progrès considérables ont vu le jour et il nous paraît que c'est une nouvelle ère de la traction électrique qui s'ouvre: si des technologies ont disparu ou presque, d'autres se sont affirmées de manière intangible.

Vers la fin du siècle dernier, d'aucuns pronostiquaient la fin du chemin de fer à plus ou moins longue échéance. Il est vrai que la concurrence, désordonnée, de la route et de l'aviation ont porté un coup sensible au "fer", mais ce dernier a fait mieux que se défendre et a apporté un nouveau visage à ce moyen de transport dans plusieurs domaines: *la grande vitesse*, le *fret* (comme on appelle aujourd'hui le transport des marchandises) et les *déplacements urbains*.

En matière de transport de voyageurs (que la mode actuelle désigne sous le vocable de *passagers – passengers*) il faut d'abord citer l'extraordinaire maturité de la très grande vitesse à longue distance (ce qui correspond en langage ferroviaire à la moyenne distance en aviation). Il ne s'agit plus maintenant de quelques modestes tronçons d'essai, mais de réseaux nouveaux tels que les *Shinkansen* japonais ou les *TGV*, *AVE* et *ICE* européens en pleine expansion, en plein progrès et – surtout – en plein succès.

En même temps, le transport de choses (les matières premières, les marchandises, la poste,...) fait preuve d'une vitalité nouvelle, malgré la concurrence forcée de la route, mal gérée et ingérable. Le rail se défend en introduisant la notion de trains très lourds, sorte de puissants cargos sur rail ou même quasi-démesurés dans des pays où jusqu'ici rien ne se faisait ou presque. Nous pensons aux nouvelles lignes de pondéreux au Brésil, en Afrique du Sud en Australie et ailleurs. Même en Europe – sur des lignes à profil très difficiles – on voit apparaître des convois en double, triple, voire quadruple traction, de *plusieurs milliers* de tonnes.

Enfin, citons encore l'immense potentiel des transports urbains, avec l'énorme capacité des métros locaux ou de banlieue (réseaux dits RER) sans oublier la renaissance du tramway moderne. Ce tramway si décrié il y a peu d'années seulement, mais qui est bien maîtrisé et admis aujourd'hui.

Ces progrès spectaculaires n'auraient jamais pu être concrétisés sans l'apport des technologies nouvelles fondées sur l'électronique de puissance et l'électronique de commande (ou de pilotage) ainsi que sur les transmissions mécaniques innovantes. Ce sont toutes ces technologies nouvelles qui ont permis la maîtrise des très grandes vitesses, des très fortes

charges, des économies d'entretien (la fameuse *maintenance*). Par ce techniques, on a pu réaliser des engins moteurs poly-systèmes à faible surcoût en regard des mono-systèmes: on tend ainsi vers une universalité du matériel de traction, impensable il y a peu et qui facilitera les échanges internationaux, mais aussi un spécialisation en fonction des tâches assignées: banlieue, fret, grande vitesse. Ces techniques on aussi permis la réalisation de véhicules surbaissés qui accélère les échanges d'usagers aux points d'arrêt.

La traction monophasée à fréquence industrielle se développera inexorablement en grande traction partout où les responsables de l'énergie électrique voudront bien l'utiliser à bon escient. Certes, les systèmes à courant continu continueront à être employés en trafic urbain et suburbain. Si certains réseaux devront conserver le courant continu à moyenne ou haute tension et d'autres le monophasé à fréquence spéciale – leur structure ne pourrait être transformée abruptement qu'au prix de coûts exorbitants – on ne leur voit pas en tout objectivité un grand avenir de développement. Même des "maillons manquants" pourraient être électrifiés en fréquence industrielle au milieu de réseaux électrifiés autrement, sachant qu'on fera appel à des engins poly-systèmes.

Notre ouvrage mentionne aussi la traction diesel-électrique. On aurait mauvaise grâce de passer sous silence que la traction thermo-électrique est un des acteurs importants du trafic lourd et même très lourd, en particulier là où les frais d'électrification ne se justifient pas au vu de la faible fréquence des convois sur des lignes parfois longues et isolées. Dans ce domaine aussi, les électroniques ont fait une irruption logique.

En une décennie, de grands bouleversements sont apparus dans le domaine de l'industrie ferroviaire: non seulement des moyennes entreprises, mais de grandes industries réputées et expérimentées ont disparu, des regroupements ont été faits, parfois cahin-caha, parfois avec brutalité. Nous pouvons même admettre que cela s'est fait au détriment de la connaissance (le fameux *know-how*), évanouie, disparue peut-être avec le départ de fins connaisseurs et de bons spécialistes. Nous ne polémiqons pas, nous constatons. Comme nous constatons aussi que certains gestionnaires du chemin de fer ou des transports publics – malgré de cuisantes expériences – les ont menés vers des échecs notables. Malgré les errances probables, nous continuons à croire au formidable potentiel offert par la traction moderne, sur rail en particulier, comme à son important impact socio-géographique, heureux complément au désordonné trafic automobile.

Un cours de traction électrique peut encore, et doit encore, se donner dans une grande Ecole à qui il incombe de former les futurs cadres techniques des transports terrestres organisés de demain. C'est eux qui seront indispensables et capables de la saine gestion de ce domaine indispensable à la vie de l'homme moderne.

### 1.3 Introduction à l'édition en ligne

Dans les documents mis en ligne, on mettra le poids sur les solutions novatrices qui permettent aux transports publics – urbains, régionaux ou à longue distance – de connaître une phase de développement soutenu. On évoquera cependant quelques solutions anciennes, de manière moins détaillée que dans l'édition imprimée :

- La durée de vie des véhicules ferroviaires permet à des conceptions, qui peuvent aujourd'hui paraître obsolètes, de poursuivre une activité régulière en service commercial.
- La connaissance historico-technique aide à comprendre des comportements dynamiques (électriques ou mécaniques) de manière à expliquer des choix technologiques récents.



Par rapport à la version imprimée, on a conservé les mêmes numéros de figures, mais leur présentation peut être un peu différente, notamment pour mettre en évidence comment on passe de traction à freinage. Ce résumé invite à acquérir la [version complète](#) aux PPUR.

## 1.4 La locomotive : un convertisseur d'énergie.

La fonction d'une locomotive *électrique* est de convertir de l'énergie électrique en énergie mécanique. Comme cette conversion varie dans le temps, on doit plutôt parler de conversion de puissance.

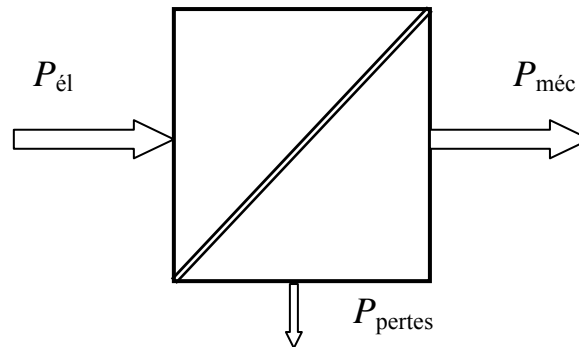


Fig. 1.1 Conversion de puissance.

On peut détailler la conversion en trois étapes.

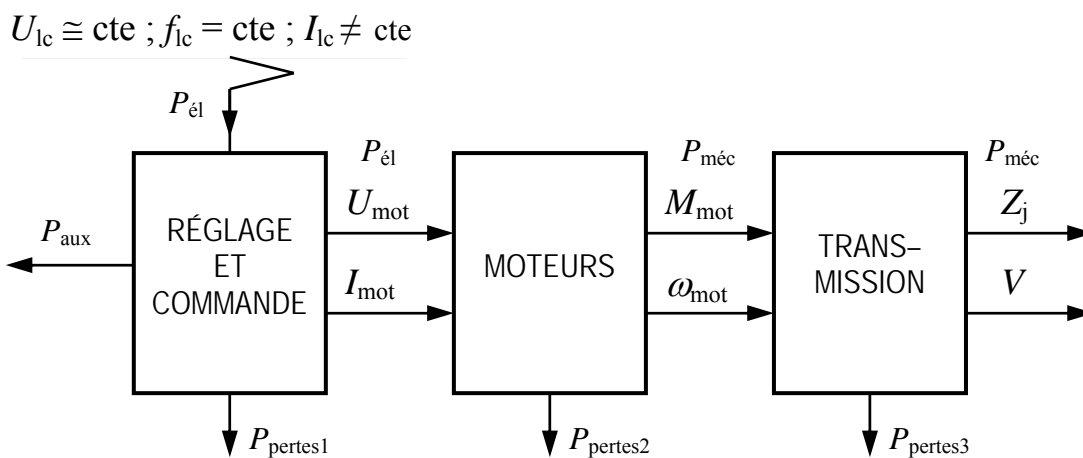


Fig. 1.2 Flux et types de puissance dans une locomotive en traction.

En cas de freinage électrique, une conversion dans le sens inverse est opérée.

## 1.5 La construction de locomotive : une tâche pluridisciplinaire.

La conception, la construction et l'exploitation d'une locomotive électrique font appel à une large panoplie de sciences et techniques (Fig. 1.3). De plus en plus, il est nécessaire de mettre en place ce concept pluridisciplinaire dès la conception, afin d'optimiser le véhicule.

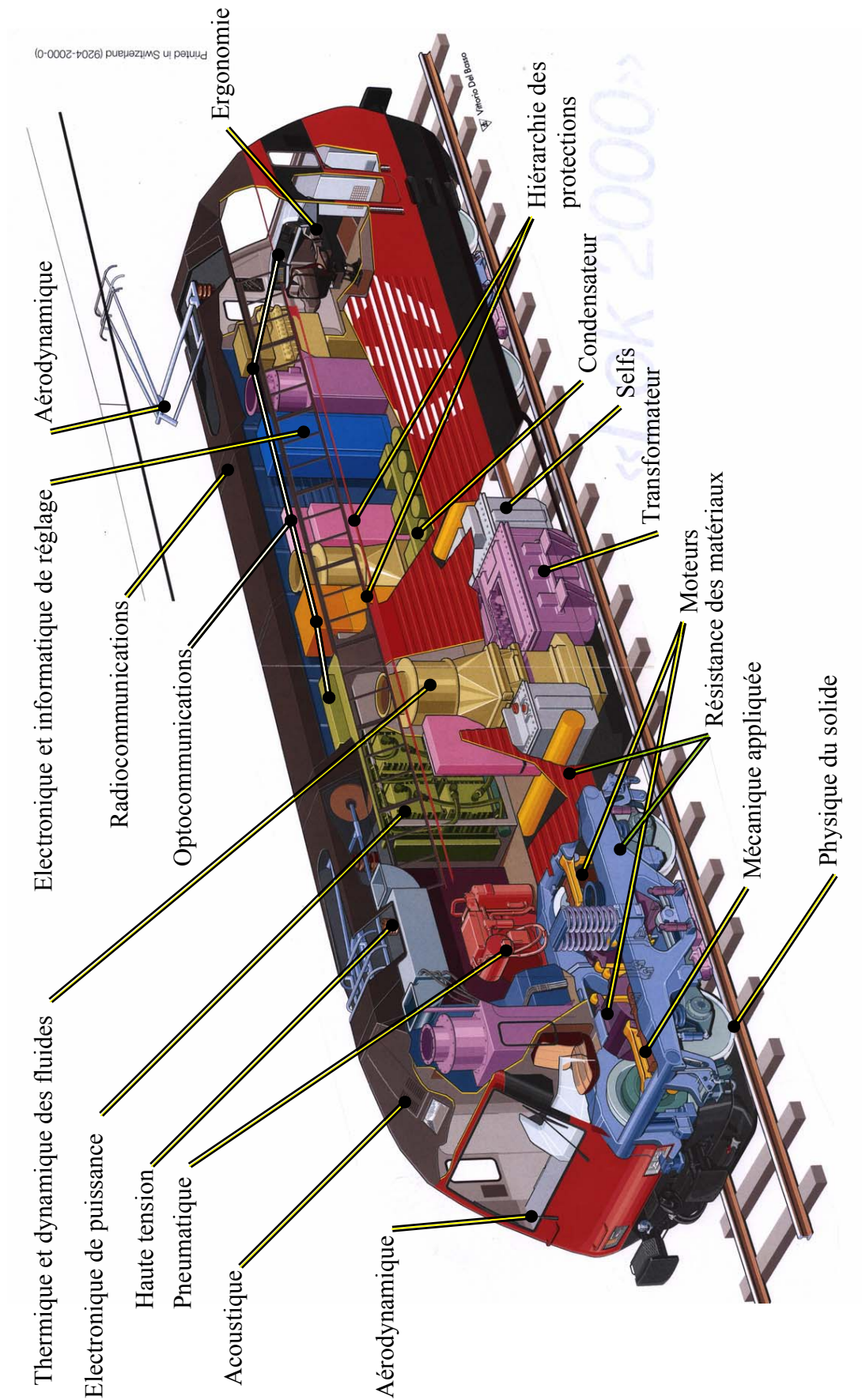


Fig. 1.3 Une locomotive et les techniques appliquées.

## 2.1 Interdépendance du développement

L'histoire des chemins de fer et de la traction électrique est liée au rythme du développement de l'électrotechnique, en particulier la fabrication des transformateurs, des moteurs de traction et des semi-conducteurs. La mode, ainsi que des choix politiques ou stratégiques ont aussi influencé de manière non négligeable l'évolution de la traction électrique.

Sur le plan des électrifications, les solutions technologiquement solides ont été mises en œuvre avant que des solutions plus économiques atteignent un degré de fiabilité suffisant pour les supplanter dans les nouvelles réalisations, comme le montre la figure 2.1.

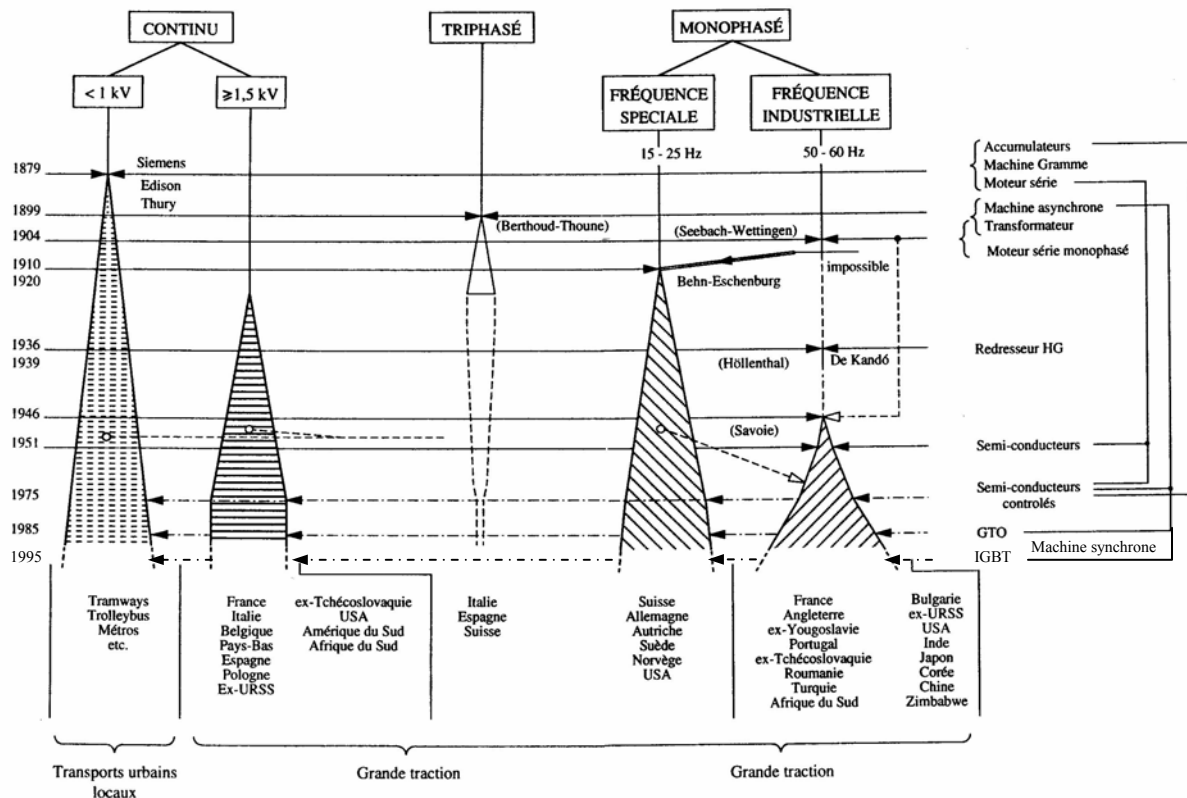


Fig. 2.1 Evolution des systèmes.

## 2.2 Epoque contemporaine

De nos jours, seuls deux systèmes sont encore en expansion : le monophasé à fréquence industrielle pour la « grande traction » et le continu à basse tension pour les transports urbains. Cependant, on continue à utiliser des infrastructures héritées de choix opérés – souvent avec pertinence – il y a plus d'un demi siècle qu'on réaliserait aujourd'hui autrement s'il fallait partir de zéro. Les alimentations à tension continue ou à fréquence spéciale en grande traction n'ont plus d'autre raison d'être que les coûts insupportables que provoquerait leur remplacement.

Pour la conception des véhicules moteurs, on vit un tournant remarquable. Pendant trois quarts de siècle, le concepteur électricien a estimé rapidement le poids futur de la partie

électrique d'un engin moteur en fonction des performances demandées par le client. Le concepteur mécanicien devait ensuite trouver les solutions pour respecter la charge maximale par essieu que la voie et ses infrastructures pouvaient supporter. Les parties mécanique et électrique étaient souvent réalisées par des entreprises différentes, ou au mieux par des divisions indépendantes dans la même entreprise. Chaque partenaire devait alors développer les équipements dans le détail en respectant l'enveloppe de poids définie au départ. Dès les années '70, l'électronique d'assistance à la conduite a pris peu à peu sa place au côté des parties mécanique et électrique.

Les années couvrant le changement de millénaire ont été marquées par une véritable révolution au niveau de la conception. On s'est mis à concevoir les locomotives, automotrices ou trains automoteurs de manière globale, en recherchant l'optimisation du produit final par interaction informatique – électrotechnique – mécanique. Les développements de détail des diverses parties sont ensuite chapeautés par un "maître d'œuvre" qui définit les cahiers des charges précis de tous les équipements fournis par divers sous-traitants ainsi que les interfaces entre eux. Dans le développement, on inclut aussi de manière approfondie le réseau d'alimentation et la géométrie des voies des lignes où le futur véhicule est appelé à circuler. Une telle approche a permis une optimisation des poids et des coûts (fabrication ou exploitation) en comparant avec des véhicules similaires à peine plus âgés (Exemples: *185* de Bombardier, *Citadis* de Alstom, *Flirt* de Stadler, *ICE3* de Siemens).

### 3.1 Equations générales

Le mouvement d'un train est essentiellement celui d'un mobile de masse  $m$  à un degré de liberté. On peut le décrire par une équation de Newton scalaire.

$$\sum_{i=1}^n F_i = m \cdot a \quad (3.1)$$

On distingue les forces produites dans le train : force due aux moteurs et force de freinage mécanique et les forces subies par lui : frottements propres et forces localisées (déclivité, frottements supplémentaires en courbe ou en tunnel).

Les frottements propres peuvent être décomposés en une part constante, une part proportionnelle à la vitesse de translation et une part proportionnelle à son carré.

$$F_f = A + Bv + Cv^2 \quad [\text{N}] \quad (3.5)$$

On prendra soin de vérifier si les valeurs numériques sont données pour des vitesses en [m/s] ou en [km/h]. Si on lit sur les courbes des figures 3.3 à 3.4, on n'a pas ce problème, ces courbes sont données en valeurs relatives à la masse. Pour les trains remorqués, on lira une courbe différente pour la locomotive – qui ouvre le passage dans l'air – et le convoi qui suit.

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

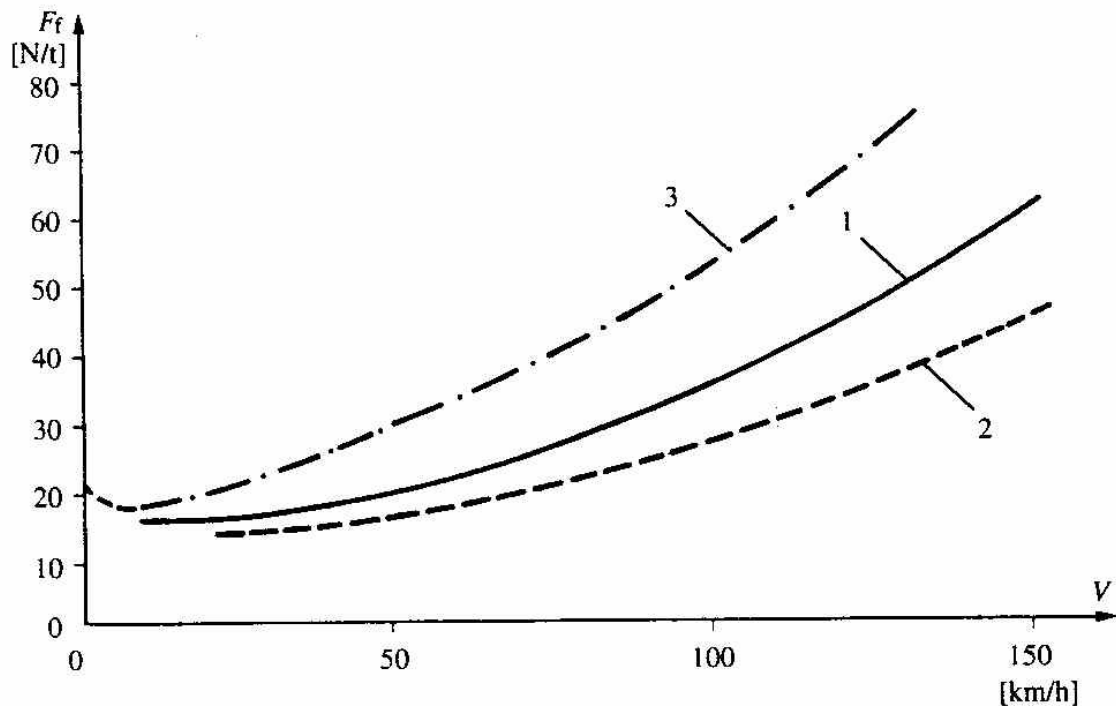
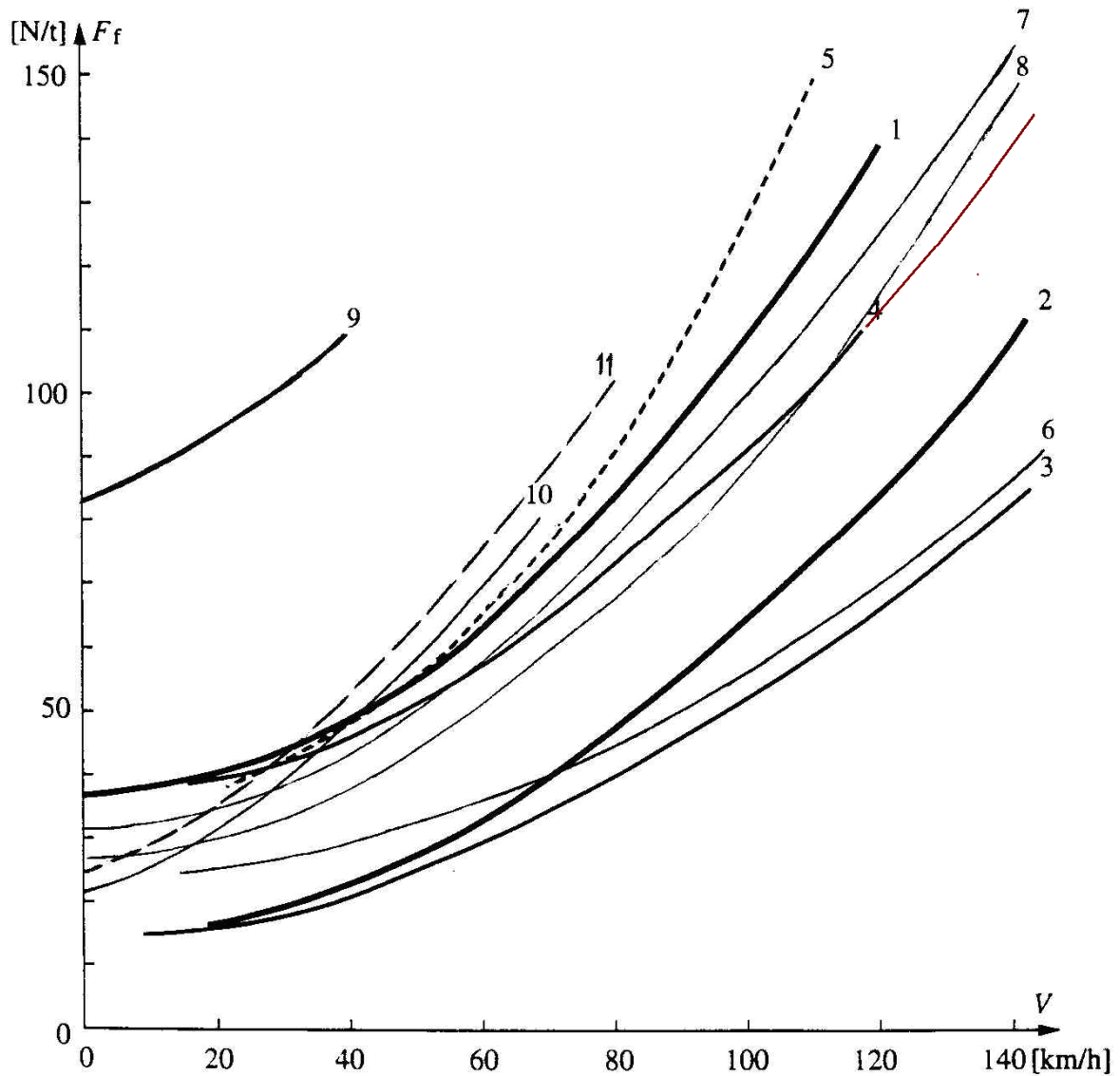


Fig. 3.4 Résistance à l'avancement de convois voyageurs.

- 1 locomotive Ae 6/6 (CFF): CoCo de 120 t
- 2 locomotive 9001 (SNCF): BB de 80t
- 3 locomotive 6001 (SNCF): CC de 120 t
- 4 locomotives Am 4/6 (CFF) : 1BoBo1 de 93 t, Re 460 (CFF) : BoBo de 84 t (—)
- 5 locomotive 2D2 (PO)
- 6 locomotive BBB (FS)
- 7 locomotive Re 4/4 II (CFF) : BoBo de 80 t
- 8 locomotive Re 6/6 (CFF) : BoBoBo de 120 t
- 9 automotrice BOB en crémaillère
- 10 automotrice BOB en adhérence
- 11 automotrice articulée TSOL ou Stadtbahn B



**Fig. 3.3** Résistance à l'avancement de véhicules moteurs.

Les trains marchandises ont des caractéristiques différentes, la diversité des formes et les parois rugueuses des wagons engendrent plus de turbulences qui augmentent les résistances aérodynamiques.

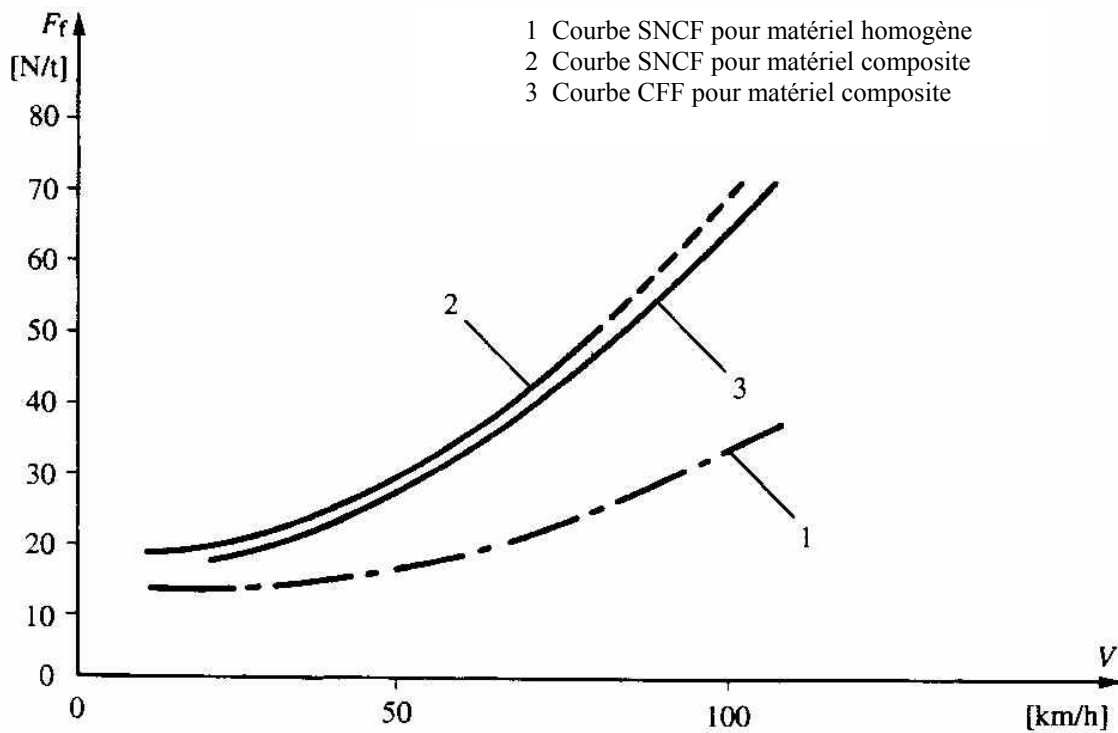


Fig. 3.5 Résistance à l'avancement de convois marchandises.

En déclivité, les résistances sont obtenues en multipliant le poids du train par la pente  $i$  de la voie parcourue, donnée en pour mille dans les tabelles. On souligne qu'on approxime ici le sinus de l'angle par sa tangente, ce qui est acceptable pour des pentes jusqu'à 120 ‰ environ.

$$F_d = m g i 10^{-3} \quad [\text{kN}] \tag{3.12}$$

Si on introduit la masse en en kilo plutôt qu'en tonne, la force sera exprimée en [N].

La force  $F_c$  de frottement supplémentaire due aux passages en courbe est localisée en certains points d'un parcours où les courbes sont de faible rayon.

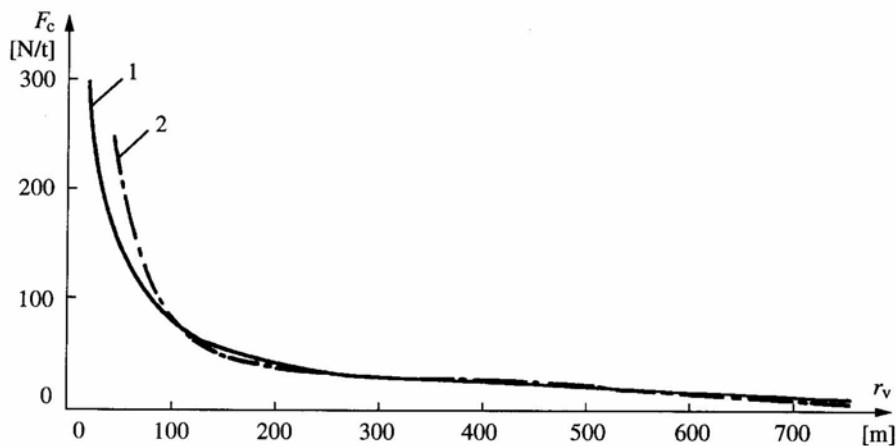


Fig. 3.10 Résistance à l'avancement due aux courbes en voie normale.

Pour la force de frottement supplémentaire en tunnel  $F_g$ , on prend le «  $Cv^2$  » de l'équation (3.5) pour un tunnel à double voie et deux fois cette valeur pour un long tunnel à voie unique. On tient compte ainsi de l'effet de piston dans le tube du tunnel. La partie aérodynamique des frottements est ainsi doublée ou triplée par rapport à l'air libre.

Pour l'accélération d'un convoi (3.1), on ne tient pas compte que de la masse qu'on peut peser, mais aussi des volants d'inertie en mouvement – roues, roues dentées, rotors de moteurs – qui introduisent une augmentation de la masse apparente pour le mouvement, symbolisée par un facteur  $\xi$ .

$$m^* = \xi m \tag{3.22b}$$

Véhicules		$\xi$
Train complet		1,06 à 1,10
Voitures et wagons	à adhérence	1,02 à 1,04
Voitures vides		1,05 à 1,12
Automotrices		1,08 à 1,14
Locomotives		1,15 à 1,30
Voitures	à crémaillère	1,05 à 1,10
Automotrices		1,30 à 2,50
Locomotives		1,50 à 3,50

Fig. 3.13 Coefficient des masses tournantes.

L'effort de traction  $Z = F_{in}$  est calculé d'après le couple  $M_m$  à l'arbre moteur, le rapport de transmission  $k_G$  et le rayon  $r_e$  de la roue et au rendement  $\eta_G$  de la transmission (ch. 5).

$$Z = \eta_G \frac{M_m}{k_G r_e} 10^{-3} \text{ [kN]} \tag{3.17}$$

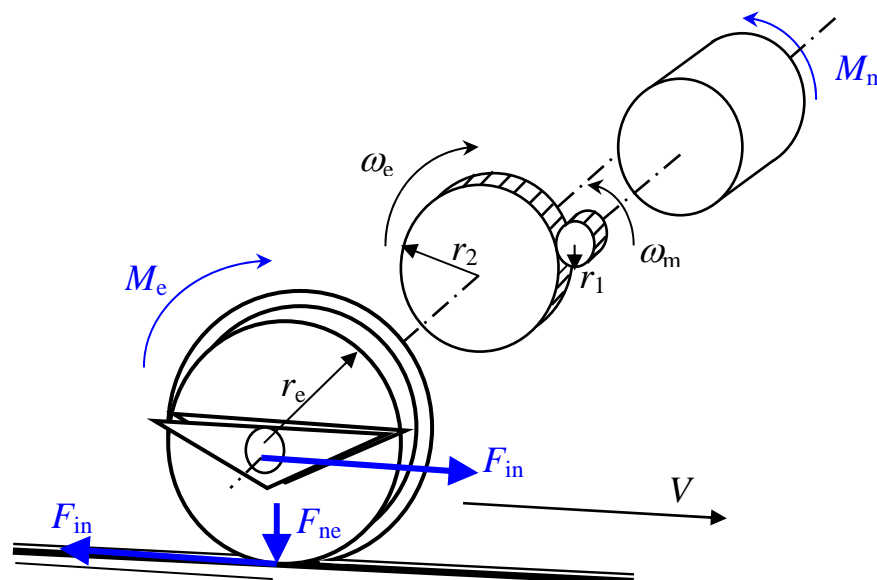


Fig. 3.12 & 3.14 De rotation à translation, avec adhérence.

A cause des condition d'adhérence des roues d'acier sur un rail d'acier, on ne peut pas développer un effort de traction ou de freinage supérieur à une valeur limite qui dépend du



coefficient d'adhérence  $\mu_r$  et de la force d'appui  $F_{ne}$  de l'essieu perpendiculairement au plan du rail. En première approximation, on peut considérer que la force d'appui de l'essieu est à peu près le quart du poids total pour une locomotive à 4 essieux, elle n'est toutefois pas constante en raison de la dynamique de la caisse et des bogies avec leurs suspensions, lorsqu'un effort de traction au crochet et les efforts aux jantes provoquent un couple de cabrage. Le coefficient d'adhérence dépend de la vitesse de translation de l'engin moteur et de la vitesse de glissement des roues sur le rail, selon des lois empiriques décrites aux figures 3.15 et 3.17.

$$Z < \mu_r F_{ne} \quad [\text{kN}] \quad (3.24b)$$

Si la condition (3.24b) n'est pas respectée, on observe un patinage de l'essieu concerné, qui ira en s'aggravant si le couple moteur n'est pas rapidement et fortement réduit par action du personnel de conduite ou d'un dispositif antipatinage.

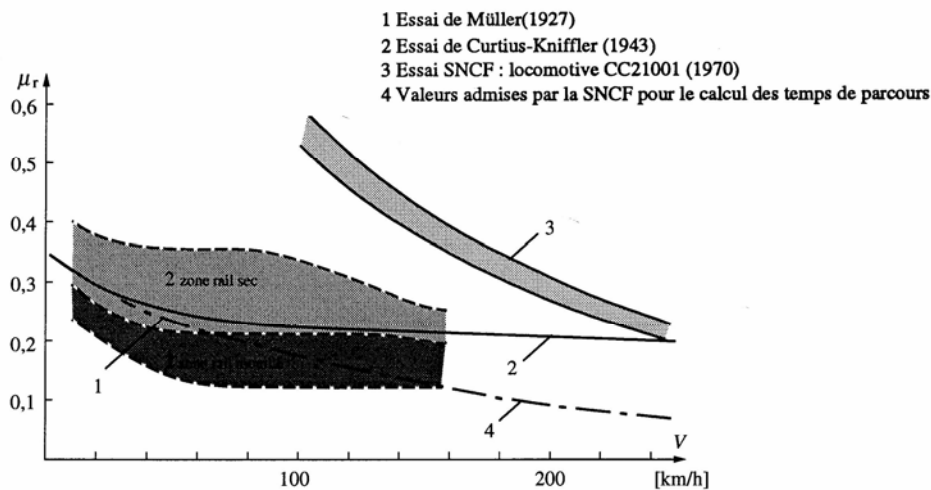


Fig. 3.15 Coefficient d'adhérence en fonction de la vitesse de translation.

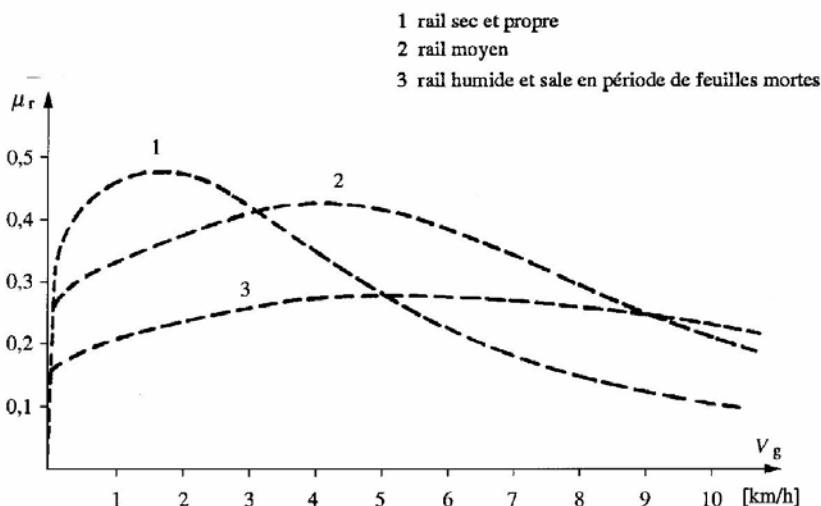


Fig. 3.17 Coefficient d'adhérence en fonction de la vitesse de glissement.

On peut encore noter que le coefficient d'adhérence d'un pneumatique sur chaussée – métro ou trolleybus – atteint près du double de celui d'une roue d'acier sur rail, soit entre 0,55 et 0,62 selon le type de revêtement.



## 4.1 Moteur à courant continu

Le moteur à collecteur est le moteur qui a garanti le développement de la traction électrique de l'origine jusqu'à un passé récent: fin du 20<sup>e</sup> siècle. Alimenté depuis une ligne de contact à tension continue, le point de fonctionnement du moteur est ajusté par un rhéostat  $R_{rh}$  – qui affecte la tension aux bornes – et un shunt  $R_{sh}$  – qui affecte l'excitation – de valeur ohmique variable. Le plus souvent, l'excitation est en série avec l'induit.

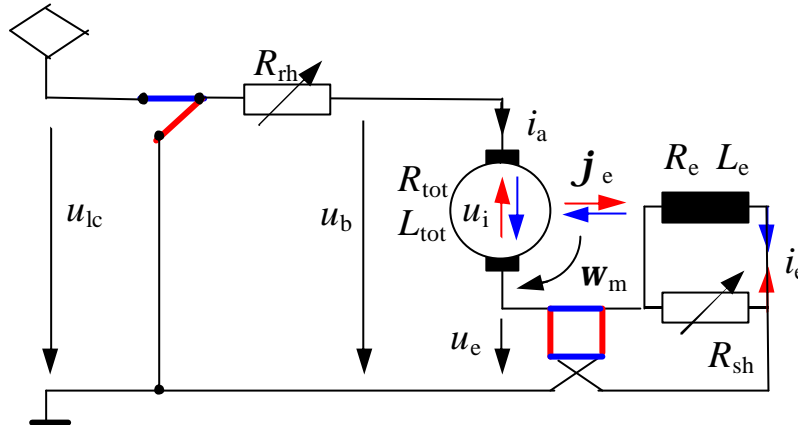


Fig. 4.4 Moteur série en traction.

Fig. 4.9 Moteur à collecteur: freinage rhéostatique à excitation série.

Les équations internes du moteur sont les suivantes, en négligeant les inductances de fuite dans le moteur. La constante du moteur est  $C_m$ ,  $N_p$  est le nombre de spires par pôle et  $p$  le nombre de paires de pôles. Le flux totalisé est  $Y_e$  et le flux d'entrefer  $j_e$ .

$$Y_e = 2pN_p f_e \quad (4.3)$$

$$u_i = C_m f_e w_m \quad (4.4)$$

$$M_m = C_m f_e i_a \quad (4.5)$$

On a l'équation dynamique du moteur – d'inertie rapportée  $J$  – qui subit un couple résistant  $M_{ex}$ . La vitesse de rotation est  $w_m$ .

$$\frac{dw_m}{dt} = \frac{1}{J} (M_m - M_{ex}) \quad (4.7)$$

On a encore les équations électriques des mailles, pour la traction.

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_{tot}} (u_{lc} - R_{rh}i_a - R_{tot}i_a - u_i - R_{sh}(i_a - i_e)) \quad (4.8)$$

$$\frac{dY_e}{dt} = R_{sh}i_a - (R_{sh} + R_e)i_e \quad (4.9)$$

Pour le freinage, seule (4.8) doit être adaptée:  $u_{lc}$  est nulle et le signe de  $u_i$  doit être changé. Les trois contacteurs permettent de sélectionner le couplage en traction (bleu) ou en freinage (rouge) pour un sens de marche déterminé. Dans l'autre sens de marche les positions des deux contacteurs de l'excitation sont permutées: freinage (bleu) et traction (rouge), mais le rôle du contacteur côté ligne de contact est inchangé (AOMC: BDeh 4/4).

On en tire les caractéristiques pour les différentes valeurs ohmiques des résistances variables. Le nombre de valeurs ohmique étant peu élevé, les variations de points de fonctionnement se font par cran.

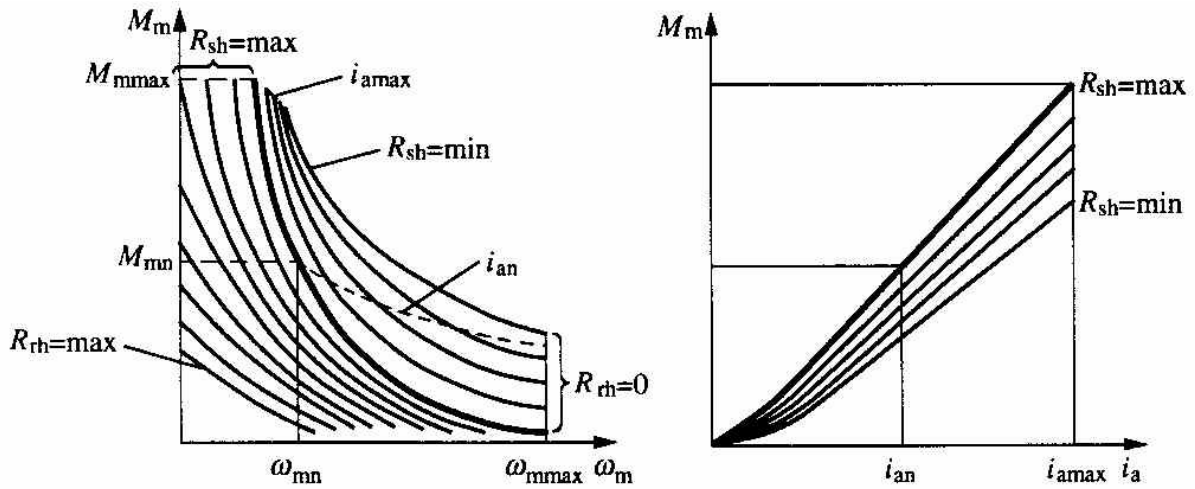


Fig. 4.6 Moteur série en traction: caractéristiques en fonction du courant et de la vitesse.

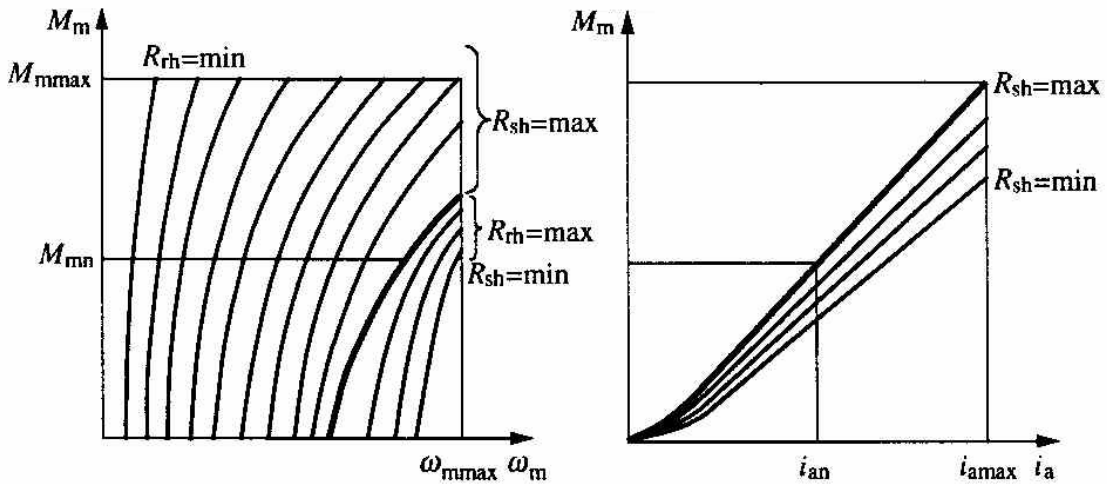


Fig. 4.11 Moteur série en freinage rhéostatique: caractéristiques en fonction du courant et de la vitesse.

En freinage rhéostatique, on peut aussi opter pour une excitation séparée  $u_e$ , fournie par une batterie (SNCF: CC 6500), par une génératrice entraînée par un moteur, lui-même alimenté par la ligne de contact (CFF: RAe TEE II).

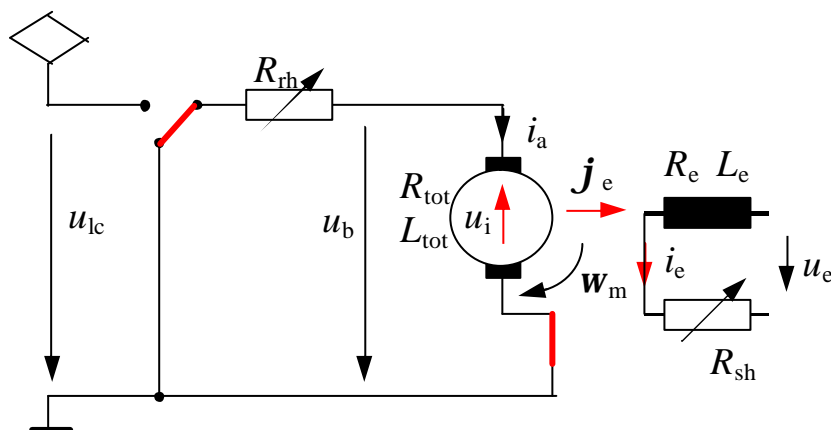


Fig. 4.13 Moteur à collecteur: freinage rhéostatique à excitation séparée.

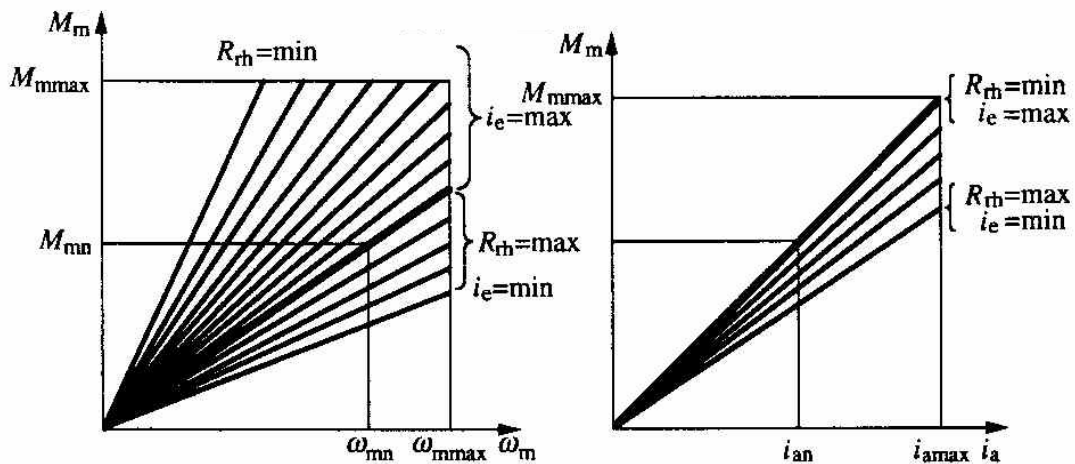


Fig. 4.15 Moteur à excitation séparée en freinage rhéostatique: caractéristiques de couple en fonction du courant et de la vitesse.

Plutôt que de dissiper l'énergie (cinétique ou potentielle) de freinage dans une résistance, on peut la réinjecter à la ligne de contact: c'est le frein à récupération.

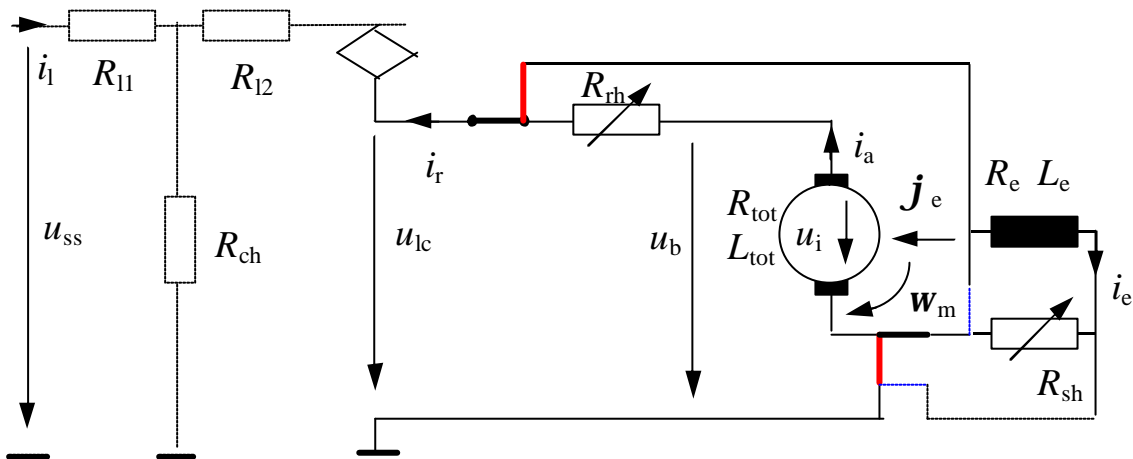


Fig. 4.17 Moteur à excitation séparée en freinage à récupération: principe.

En traction les contacteurs rouges sont ouverts et les contacteurs en pointillés bleus sont fermés.

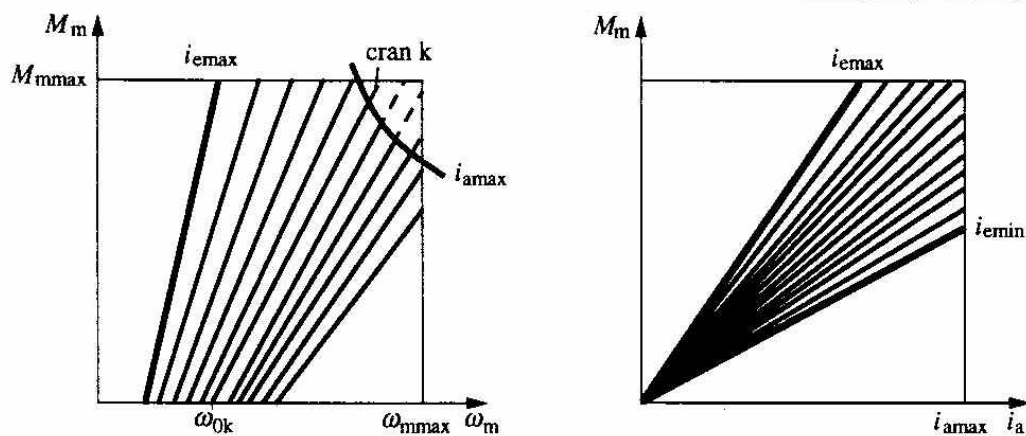


Fig. 4.19 Moteur à excitation séparée en freinage à récupération: caractéristiques en fonction du courant et de la vitesse.

Il est clair que dans tous les points de fonctionnement pour lesquels la valeur ohmique du rhéostat est non nulle, une partie de l'énergie, prélevée à la ligne aérienne, est dissipée sous forme de chaleur dans celui-ci.

Pour augmenter les zones de fonctionnement à rhéostat nul (rendement 100 % pour le dispositif de commande des moteurs), on installe des contacteurs qui permettent de grouper les moteurs en série ou en parallèle. On peut disposer les contacteurs pour garantir les transitions série-parallèle sans perte d'effort de traction.

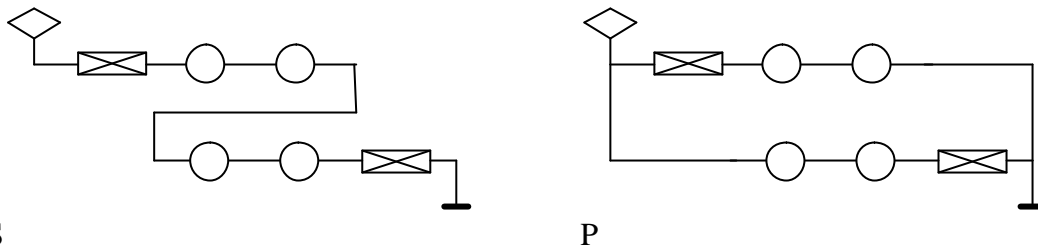


Fig 4.21B Groupes moteurs en série (S) ou en parallèle (P).

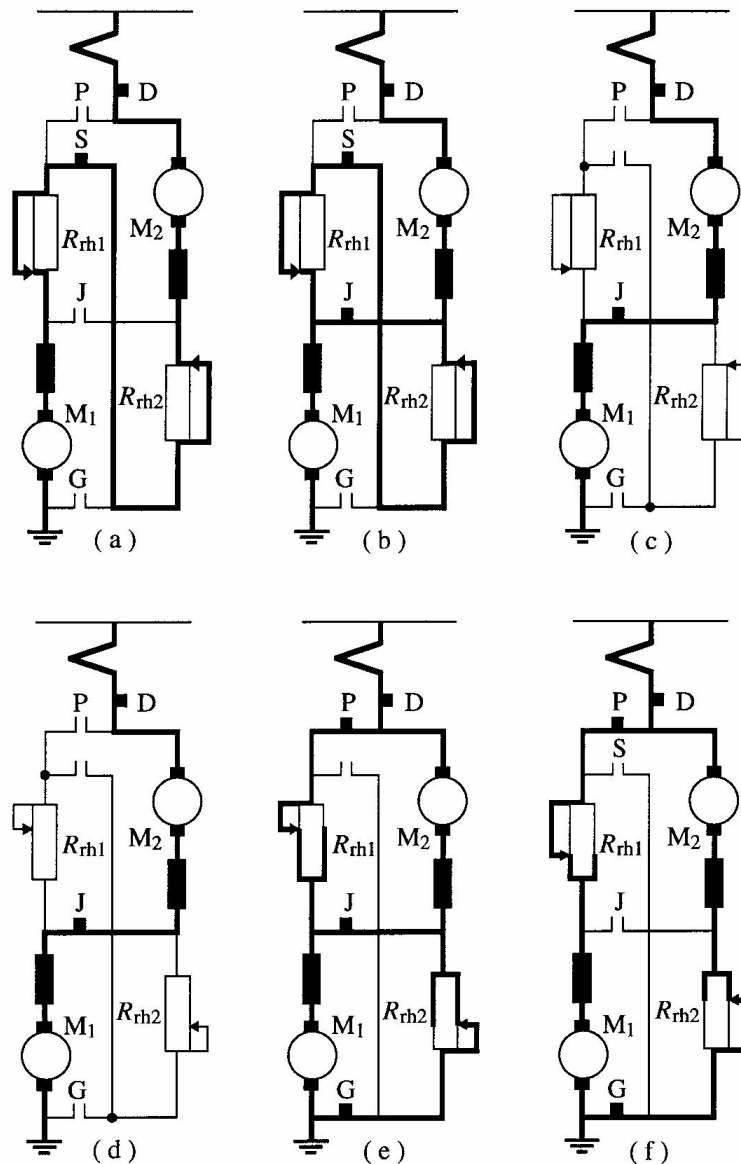


Fig. 4.22 Séquence des étapes d'une transition par la méthode du pont (BOB : ABeh 4/4 II).

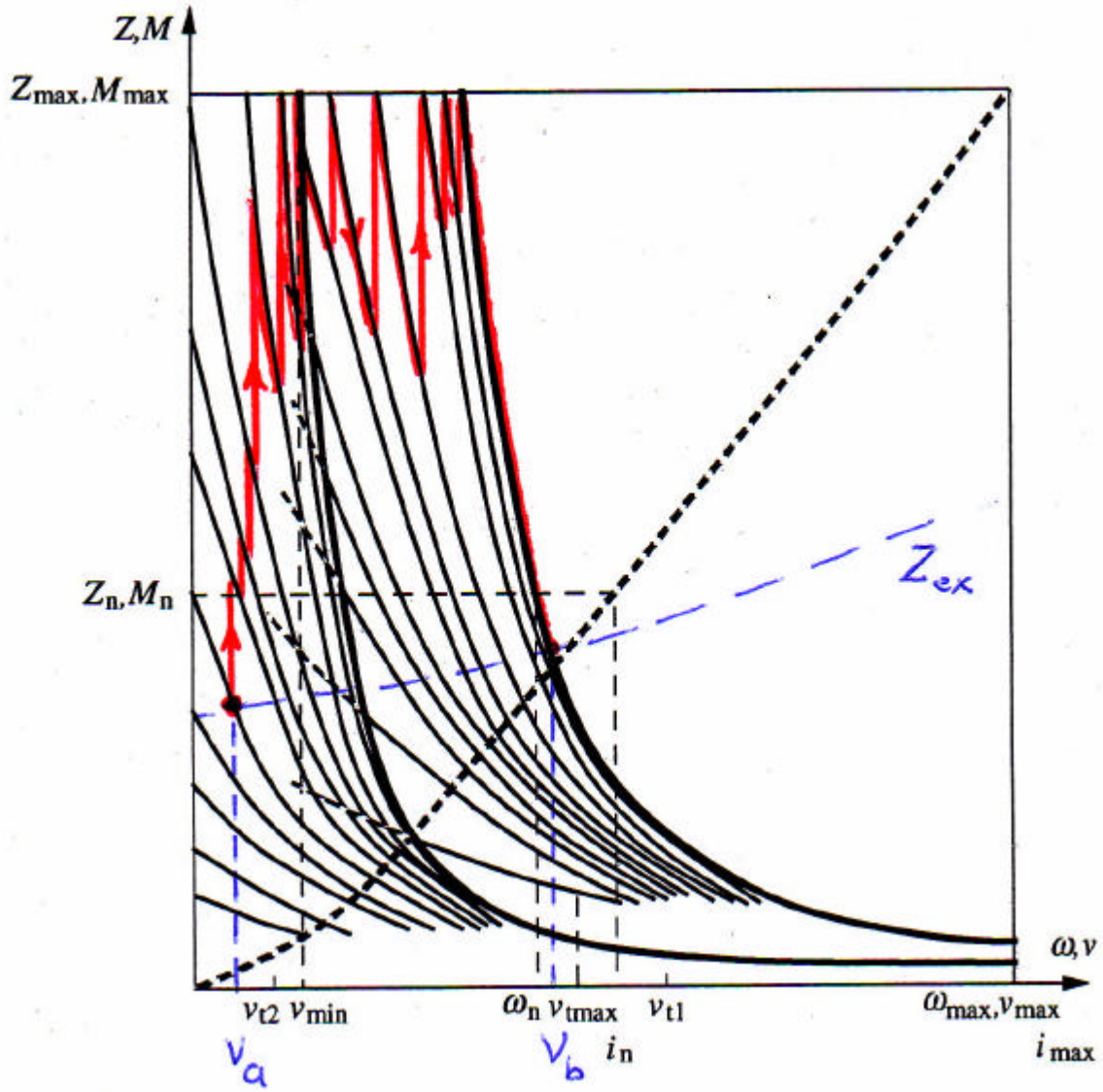


Fig. 4.21 Caractéristiques des moteurs en série (S) ou en parallèle (P).

Fig. 4.27 Accélération de  $V_a$  à  $V_b$ , pour effort de traction maximal : trajectoire des points de fonctionnement.

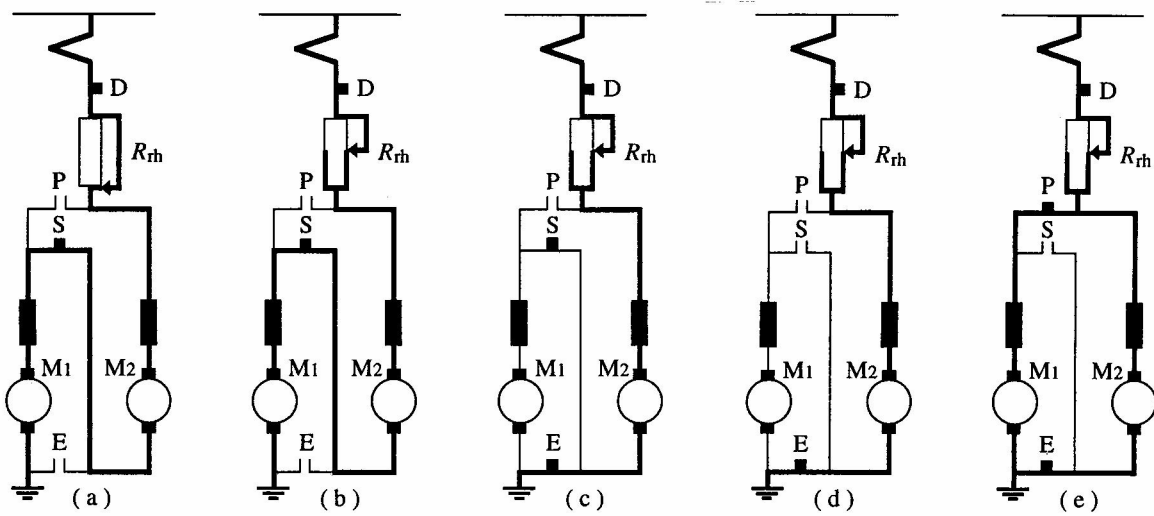


Fig. 4.23 Séquence des étapes d'une transition par la méthode du court-circuit (RhB : ABe 4/4).

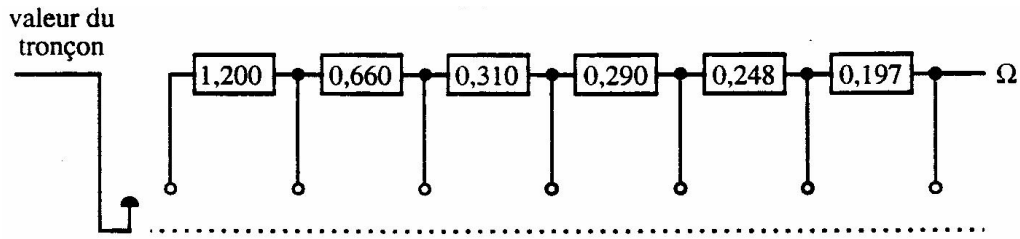


Fig. 4.34 Exemple de gradateur à courant continu. (SNCF : Z2, rhéostat N° 1).

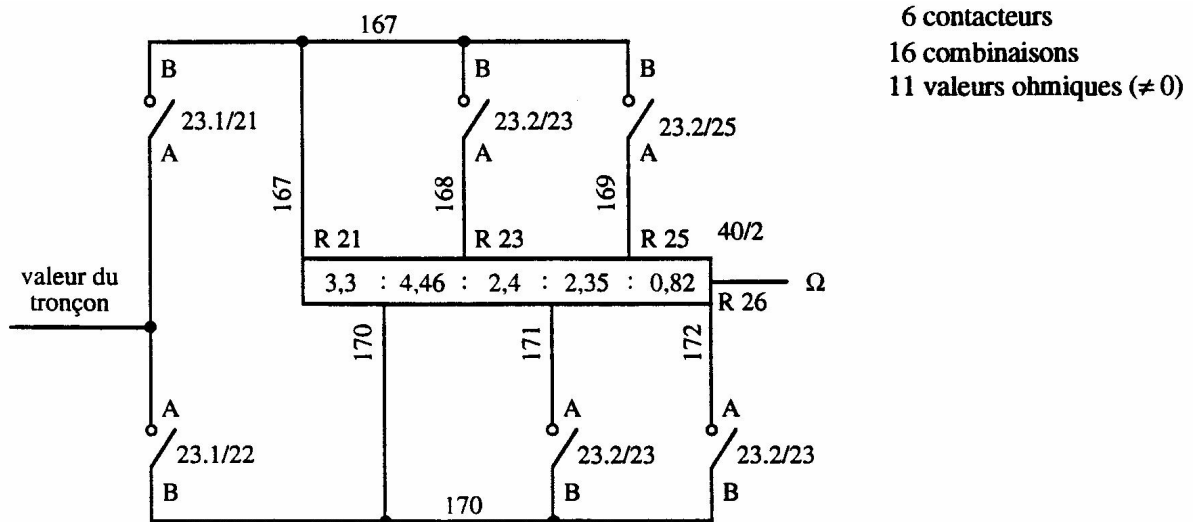


Fig. 4.35 Exemple de rhéostat à contacteurs. (BOB : ABeh 4/4 III, rhéostat N° 2).

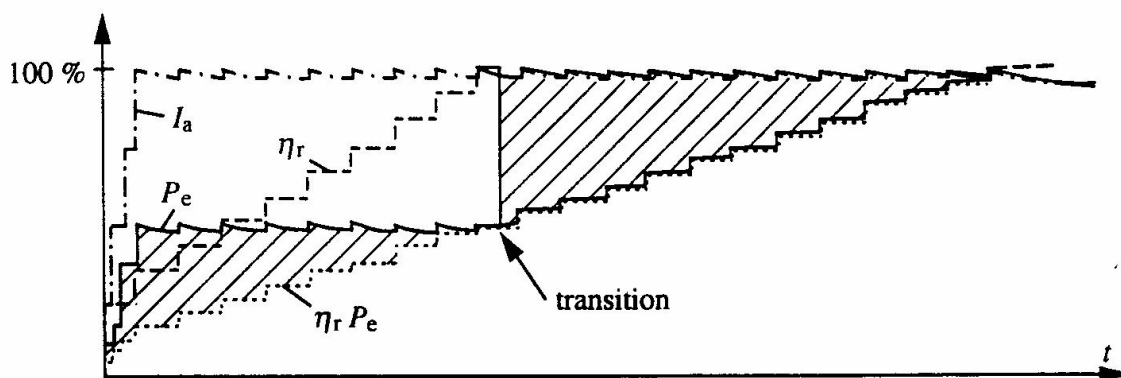
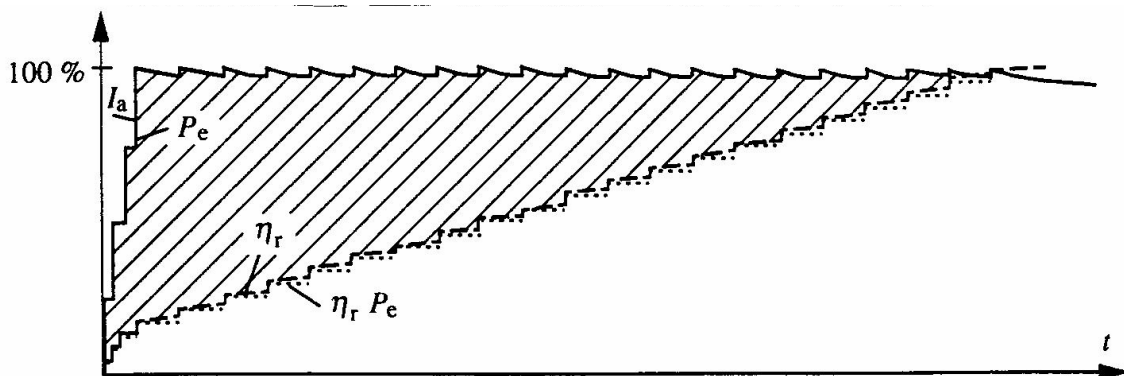


Fig. 4.36 Démarrage d'un train : pertes en rhéostat de démarrage : couplage unique (en haut) et avec série-parallèle (en bas)



### 4.2 Moteur direct

Le moteur à collecteur est le moteur qui a garanti le développement de la traction électrique de l'origine jusqu'à un passé récent: fin du 20<sup>e</sup> siècle. Alimenté depuis une ligne de contact à tension monophasée, le point de fonctionnement du moteur est ajusté par un transformateur – qui affecte la tension aux bornes. Le plus souvent, l'excitation est en série avec l'induit. C'est donc un moteur à courant continu alimenté directement par une tension sinusoïdale, d'où le nom de *moteur direct*. On verra plus loin les dispositions constructives particulières requises pour un tel moteur, développé par Behn-Eschenburg vers 1905.

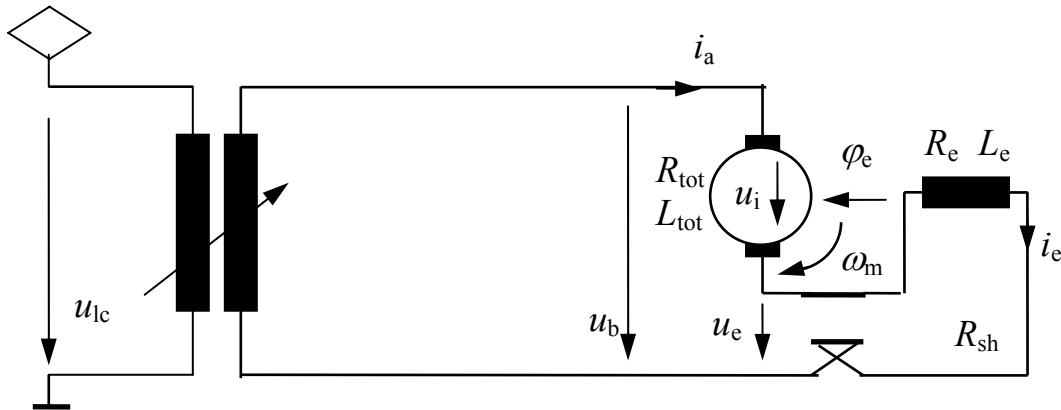


Fig. 4.42 Moteur série en traction.

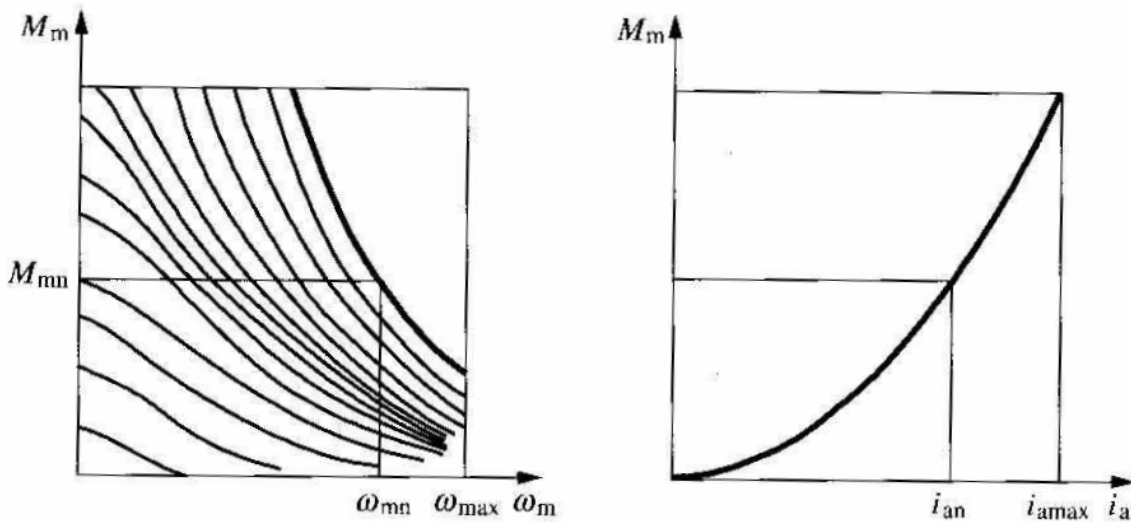


Fig. 4.44 Moteur direct en traction: caractéristiques en fonction du courant et de la vitesse.

A la section 4.1, on n'a pas mentionné l'enroulement de commutation qui permet de compenser la tension de commutation  $u_k$  qui apparaît entre deux lames successives du collecteur (voir Traité d'Electricité, vol. X, § 8.6.4), cet enroulement permet d'accélérer l'annulation du courant dans l'enroulement rotorique abandonné par les balais sur le collecteur. Il est vrai que cet enroulement n'existait pas au début des développements.

$$u_k = L_\sigma \frac{di_a}{dt} \tag{4.19}$$

Dans les moteurs série monophasés apparaît encore la tension de transformation  $u_{tm}$ .

$$u_{tm} = 4,44 \phi_e f_{lc} N \tag{4.18}$$

Pour compenser ces deux tensions, on place un shunt ohmique  $R_c$  en parallèle sur l'enroulement de commutation. En outre, pour compenser partiellement la chute de tension inductive dans le moteur, on installe encore un enroulement de compensation  $L_{comp}$ .

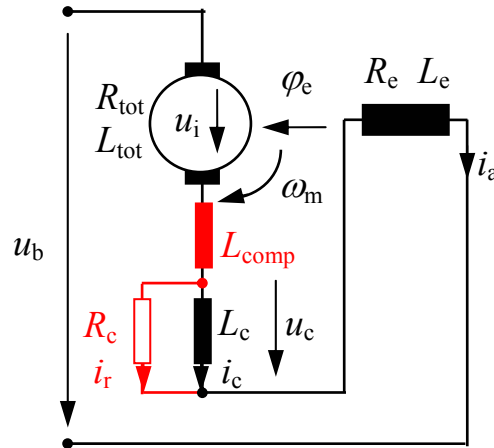


Fig. 4.37 Enroulements dans un moteur monophasé.

On peut représenter vectoriellement la tension  $u_c$  aux bornes de l'enroulement de commutation ainsi que les tensions  $u_k$  et  $u_{tm}$  pour mettre en évidence l'effet du shunt ohmique.

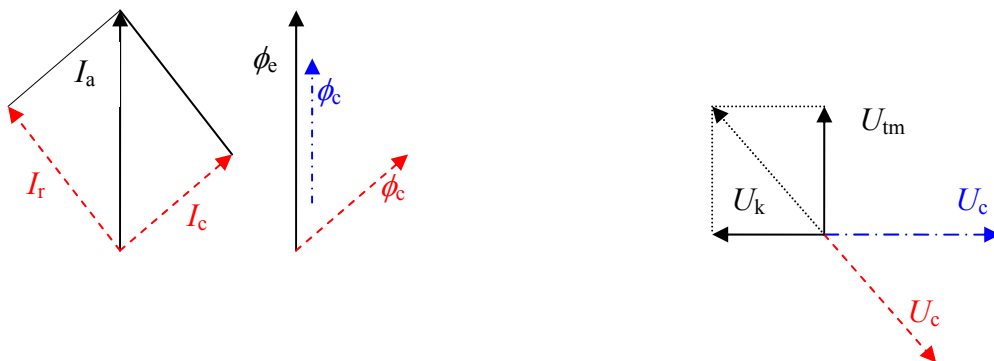


Fig. 4.38 et 4.39 Commutation dans un moteur monophasé sans et avec shunt ohmique.

Il est évident que sans shunt ohmique, seule une des composantes –  $u_k$  – de la tension au collecteur est compensée. Comme la dérivée du courant dans l'enroulement rotorique dépend de la vitesse, la compensation n'est vraiment bonne qu'à la vitesse pour laquelle le shunt est calculé, sinon, il subsiste une tension résiduelle  $u_f$ .



Fig. 4.40 Commutation dans un moteur monophasé à vitesse faible ou nominale.

On restera succinct pour le freinage en ne présentant que deux exemples assez représentatifs: un seul schéma en rhéostatique et un seul en récupération. On peut fournir l'énergie d'excitation par un groupe convertisseur embarqué (BLS : Ae 4/4).

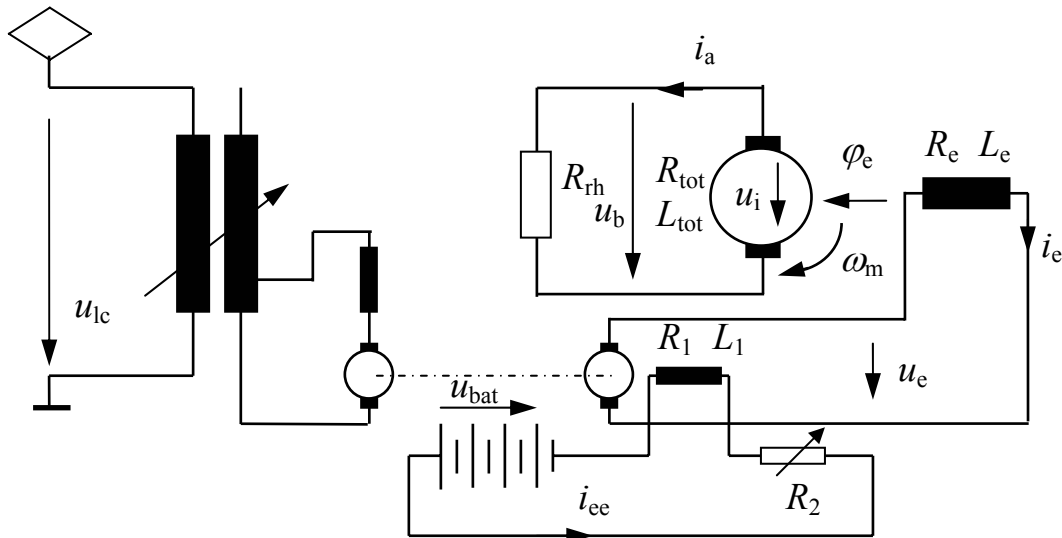


Fig. 4.46 & 4.48 Frein rhéostatique à excitation continue : schéma à groupe générateur.

Le courant d'excitation  $i_{ee}$  de l'excitatrice est faible, la résistance  $R_2$  peut être construite à variation continue plutôt qu'à gradins.

Un des moteurs de traction peut être utilisé comme génératrice pour alimenter les autres (DB:150). Le schéma est le même, mais la « machine d'excitation » est entraînée par l'essieu.

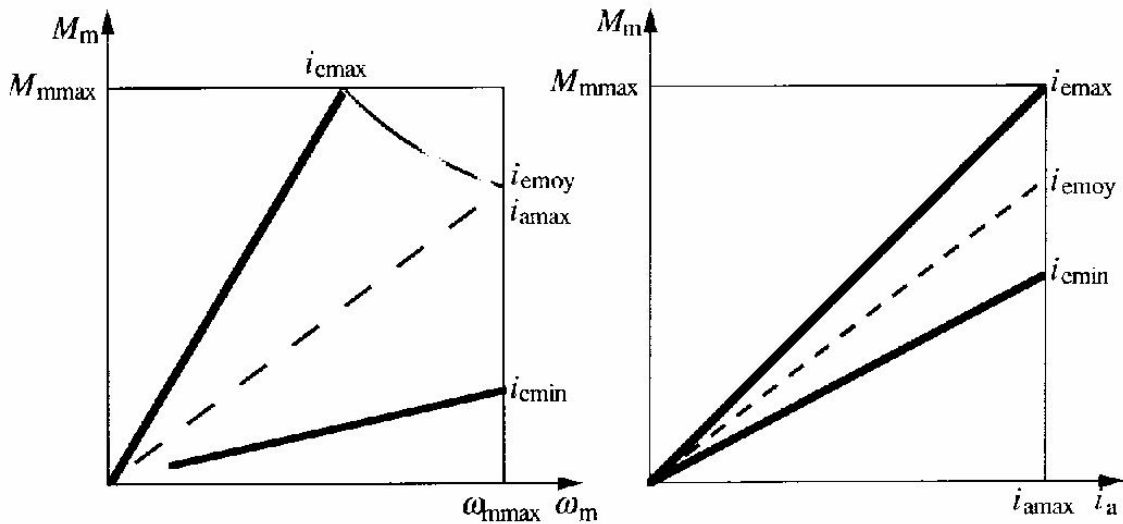


Fig. 4.50 Frein rhéostatique à excitation continue : caractéristiques.

Plutôt que de dissiper l'énergie dans un rhéostat, on peut la réinjecter dans le réseau. L'aboutissement du principe Behn-Eschenburg est le montage à excitation par un des moteurs de traction (CFF : Re 4/4 II).

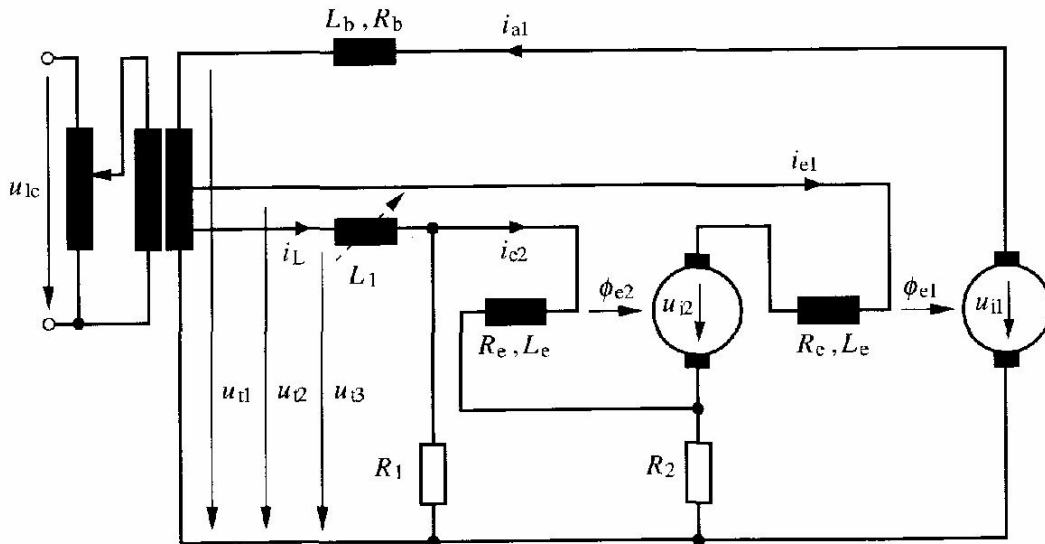


Fig. 4.59 Frein à récupération à excitation séparée: schéma à moteur d'excitation.

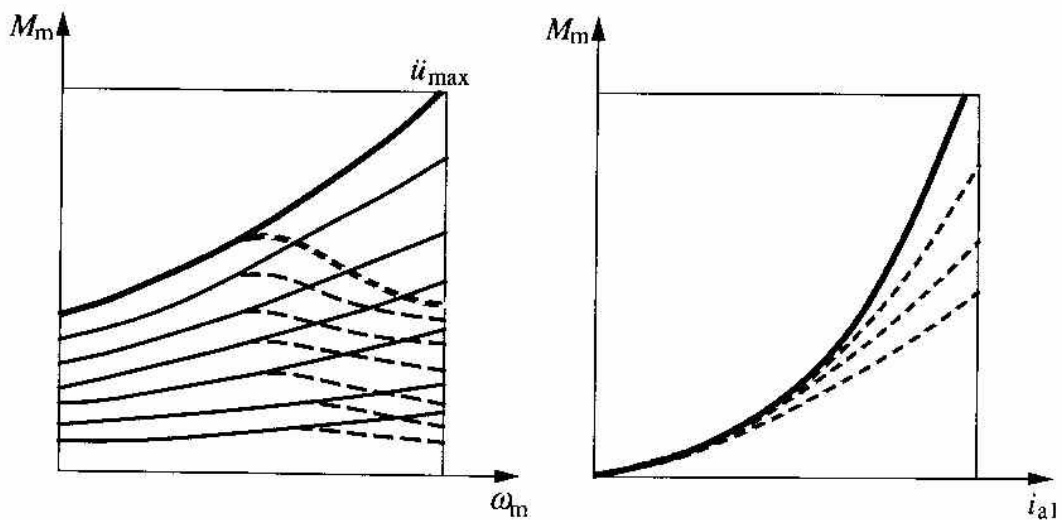


Fig. 4.61 Frein à récupération à moteur d'excitation: caractéristiques.

Le facteur de puissance de ce couplage est assez médiocre.

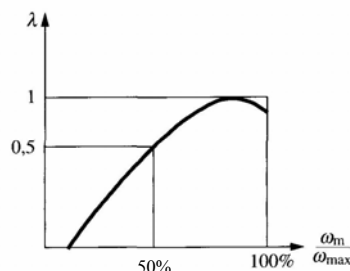


Fig. 4.62 Facteur de puissance pour freinage à moteur d'excitation.

Les deux dernières séries conçues de locomotives à moteurs directs ont été livrées dès 1972 (CFF: Re 6/6) et 1974 (DB : 155). Les dernières fabrications datent du milieu des années '80 (CFF : Re 4/4 II et DB : 155).

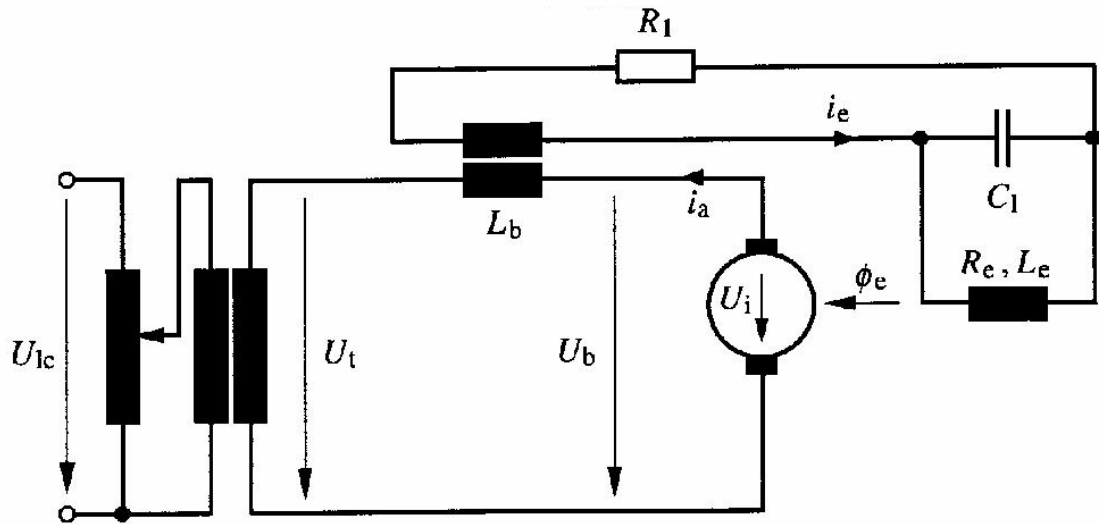


Fig. 4.63 Schéma de puissance pour freinage à circuit résonnant.

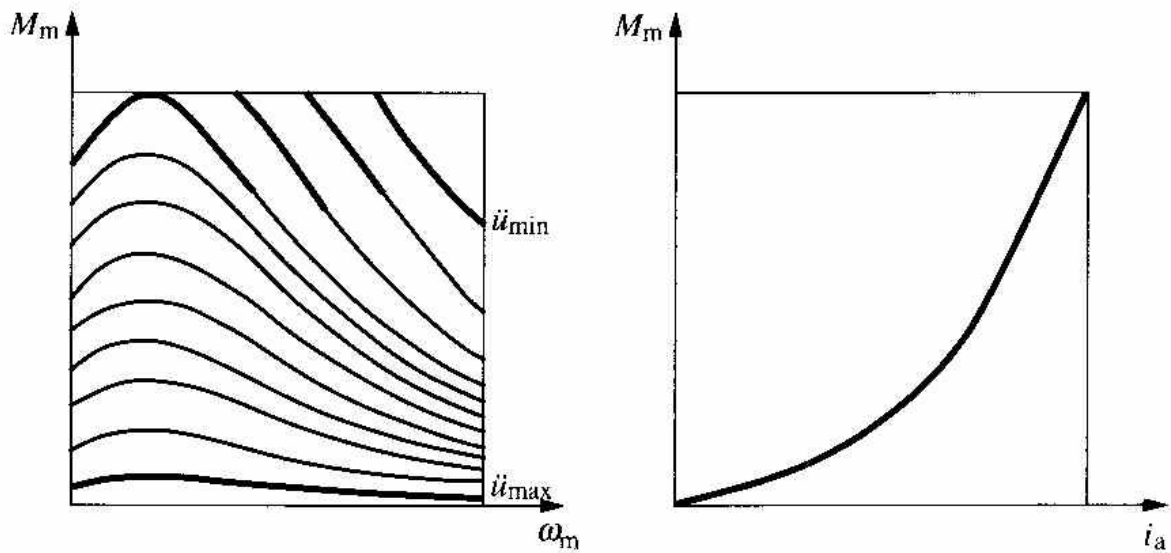


Fig. 4.65 Caractéristique de couple pour freinage à circuit résonnant.

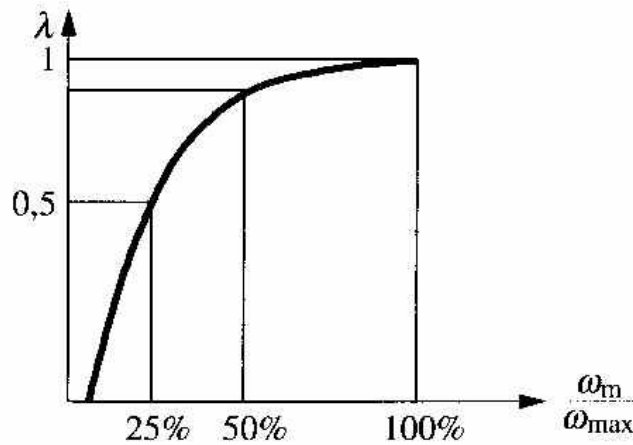


Fig. 4.66 Facteur de puissance pour freinage à circuit résonnant.

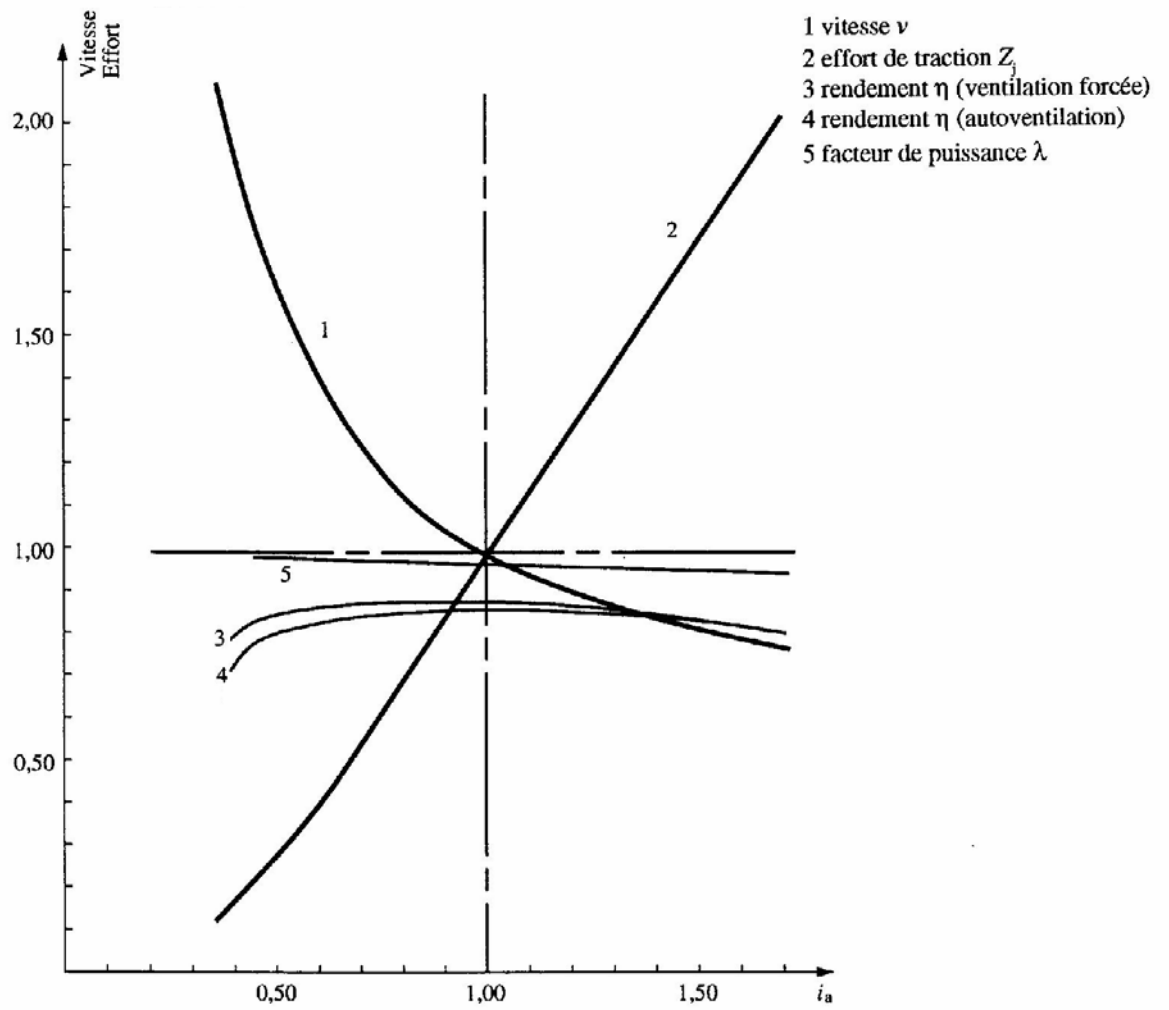


Fig. 4.67 Courbes typiques d'un moteur direct au banc d'essai.

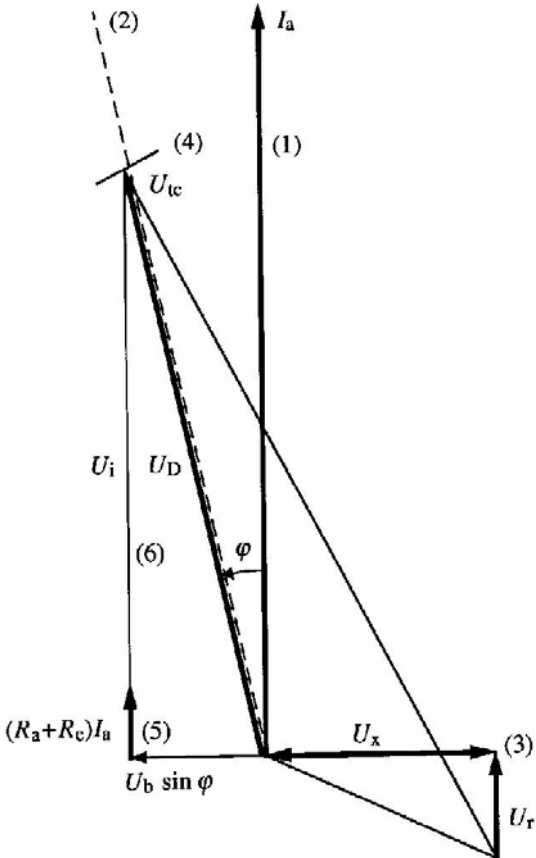


Fig. 4.71 Diagramme d'effort d'un moteur au point de fonctionnement nominal.

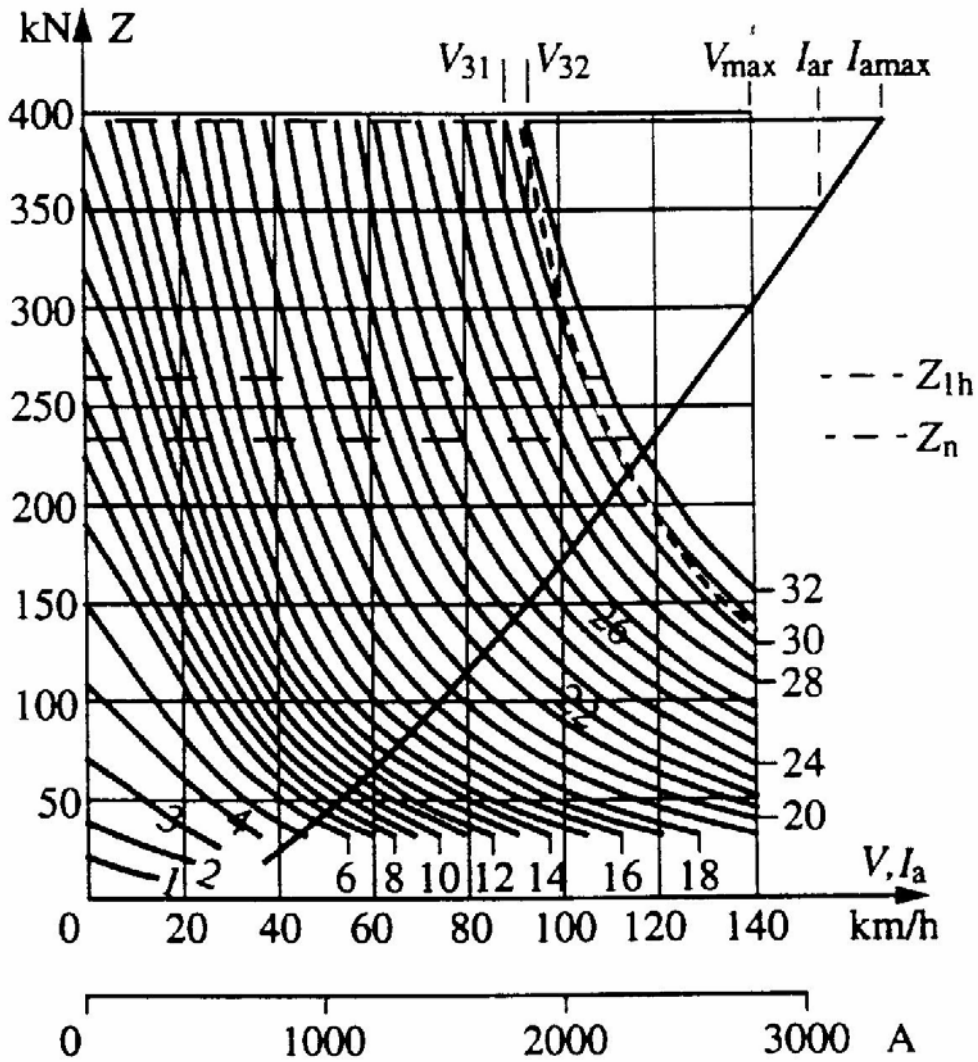


Fig. 4.72 Caractéristiques d'un engin de traction à moteurs directs.

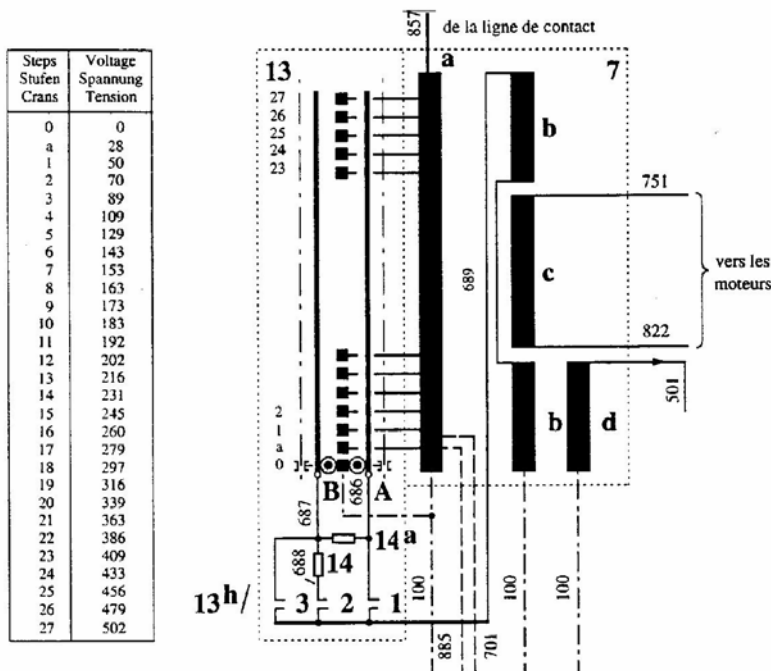


Fig. 4.74 Graduateur haute tension : locomotive CFF Ae 6/6 : 6 moteurs en parallèle pour 4300 kW.



Steps Stufen Crans	Voltage Spannung Tension	Switches Schützen									Contacteurs						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	27	28	29	30	31	32	33
0	0																
1	100	●	●														
2	140	●	●	●	●	●											
3	140	●	●	●	●	●	●										
4	167	●	●	●	●	●	●	●									
5	193		●	●	●	●	●	●	●								
6	220			●	●	●	●	●	●	●							
7	247				●	●	●	●	●	●							
8	273					●	●	●	●	●							
9	300						●	●	●	●							
10	330							●	●	●							
11	360								●	●							
12	390									●							
13	427																
14	463																
15	500																
16	543																
17	587																
18	630																
19	677																
20	723																
21	770											●					
22	817											●	●				
23	863											●	●	●			
24	910											●	●	●	●		
25	957											●	●	●	●	●	
26	1003											●	●	●	●	●	●
27	1050											●	●	●	●	●	●

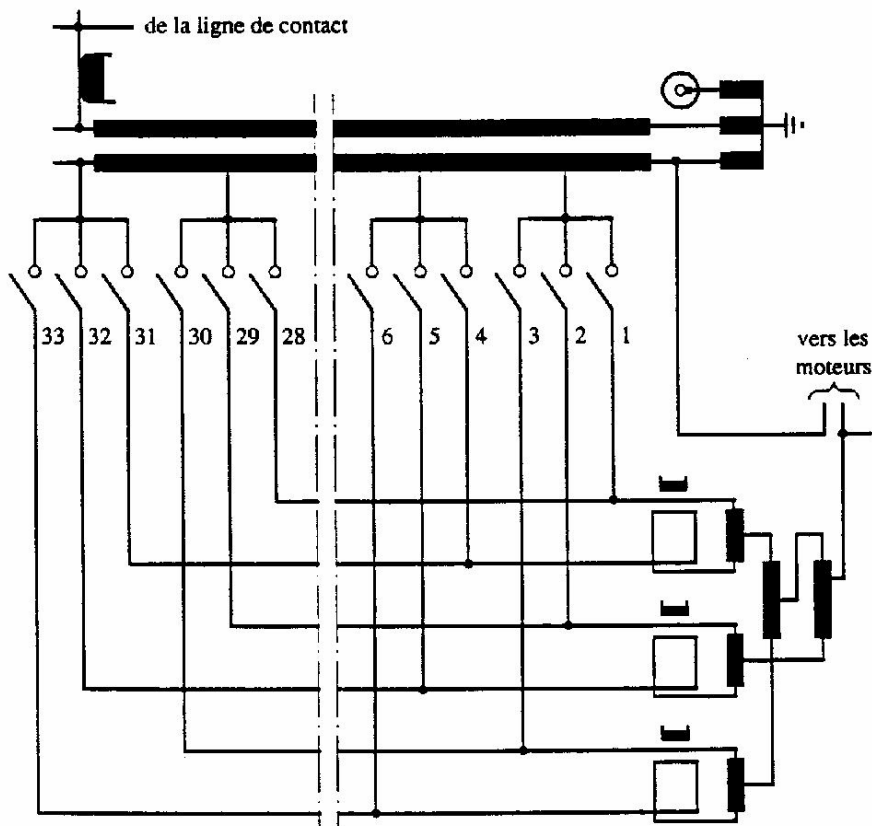


Fig. 4.75 Contacteurs basse tension : 1/3 de locomotive SJ Dm3 : 2 moteurs en série pour 2400 kW.



### 4.3 Moteur à collecteur: commande à hacheur

Sur une charge inductive, on peut appliquer une tension pulsée  $u_d$  par un commutateur  $CS$ . La tension moyenne  $u_b$  aux bornes de la charge correspond au produit du rapport cyclique par la tension d'alimentation  $u_{lc}$ . Une diode  $D_r$  dite "de roue libre" garantit l'écoulement du courant inductif lorsque le commutateur est ouvert. Un filtre d'entrée LC est dimensionné d'après la fréquence du hacheur pour limiter les ondulations du courant dans le réseau d'alimentation.

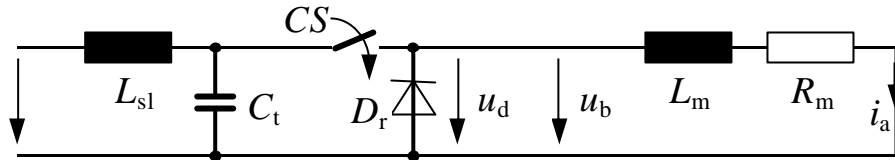


Fig. 4.77 Principe du hacheur.

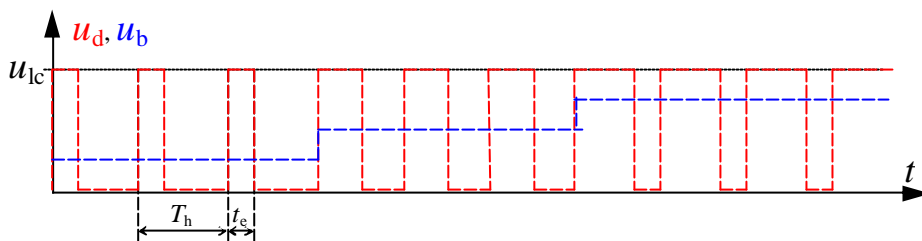


Fig 4.78 Tensions instantanée  $u_d$  et moyenne  $u_b$  à la sortie du hacheur.

$$u_b = u_{lc} \frac{t_c}{T_h} \tag{4.43}$$

Le moteur à collecteur peut être alimenté depuis une ligne de contact à tension continue à travers un hacheur. Le point de fonctionnement du moteur est ajusté par son rapport cyclique, sans discontinuité dans la variation. Le commutateur est un contacteur statique: un montage à thyristors, un GTO ou un IGBT au gré de l'évolution de la technologie entre 1970 et 2000, avec des fréquences évoluant entre 400 Hz et 2 kHz. On présente ici un schéma récent. L'inversion du flux de puissance est obtenue par changement du sens du courant d'induit. Les premières réalisations utilisaient le même hacheur en traction et en freinage: la topologie du circuit était modifiée par des contacteurs électromécaniques maniés à courant nul.

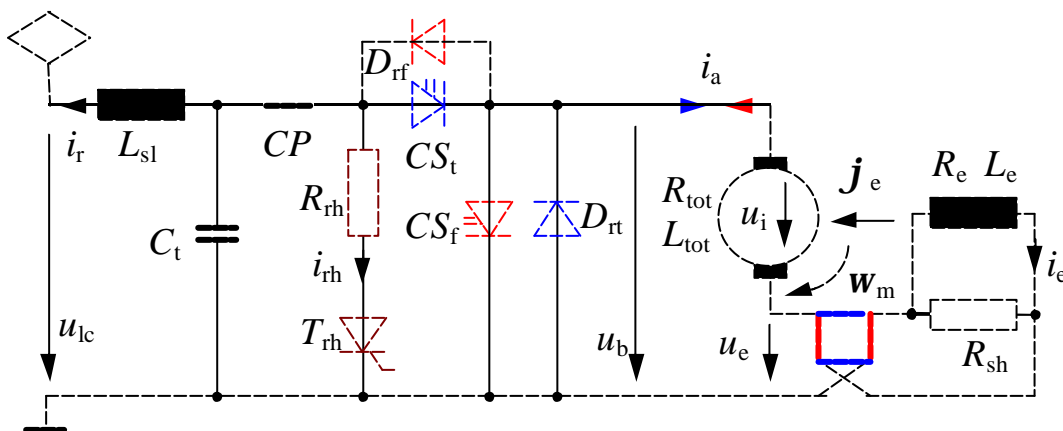


Fig. 4.76 Moteur à collecteur et hacheur: traction.

Fig. 4.82 Moteur à collecteur et hacheur: freinage à récupération à excitation série.

Fig. 4.88A Moteur à collecteur et hacheur: freinage rhéostatique à excitation série.

La résistance  $R_{sh}$  permet de dériver environ 2 % du courant d'induit moyen, mais la quasi totalité de la composante pulsante, ce chemin ne contenant pas d'inductance: on limite ainsi la pulsation sur le couple moteur. Le freinage à récupération est assuré par le contacteur  $CS_f$  et la diode de récupération  $D_f$ . Si le réseau n'est pas apte à récupérer la totalité de la puissance de freinage, le surplus est détruit dans la résistance fixe  $R_{rh}$  à travers le thyristor  $T_{rh}$ : on parle volontiers de frein combiné. En freinage rhéostatique pur (caractéristique 4.90A), le contacteur principal CP est ouvert et le contacteur  $CS_f$  pulse sur le rhéostat pour régler sa valeur ohmique équivalente, un contacteur électromécanique remplace alors souvent  $T_{rh}$ .

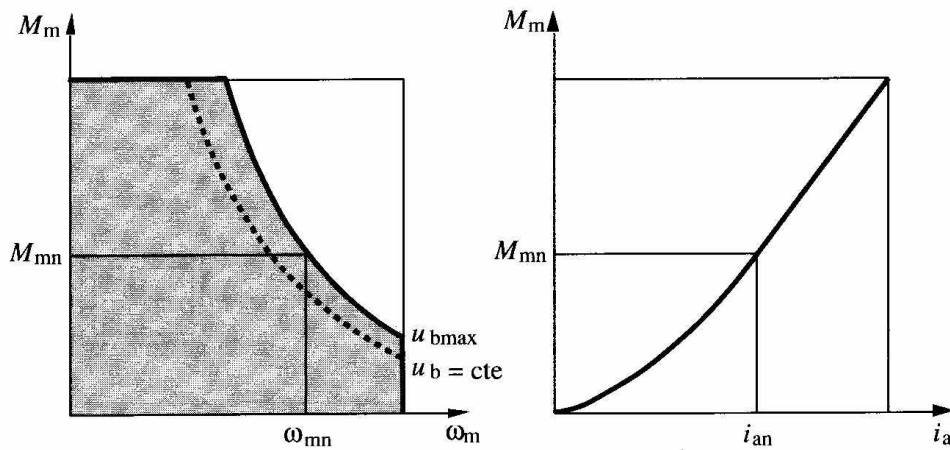


Fig. 4.79 Moteur à collecteur et hacheur: caractéristiques en traction.

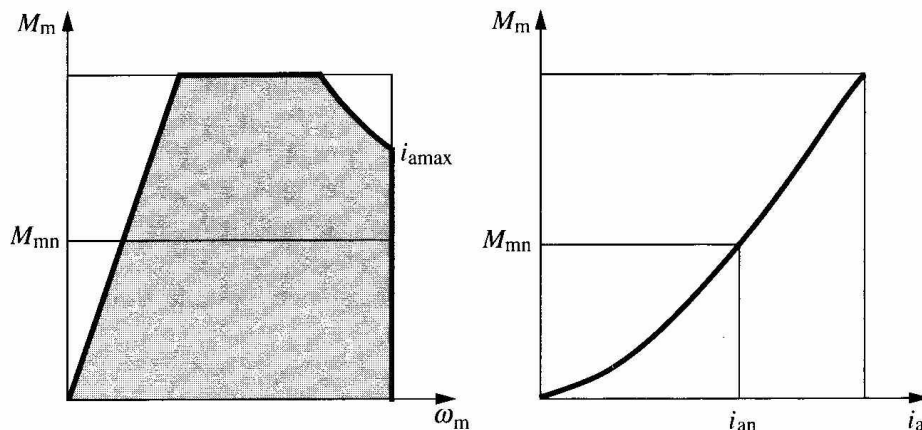


Fig. 4.85 Moteur à collecteur et hacheur: caractéristiques en freinage à récupération à excitation série.

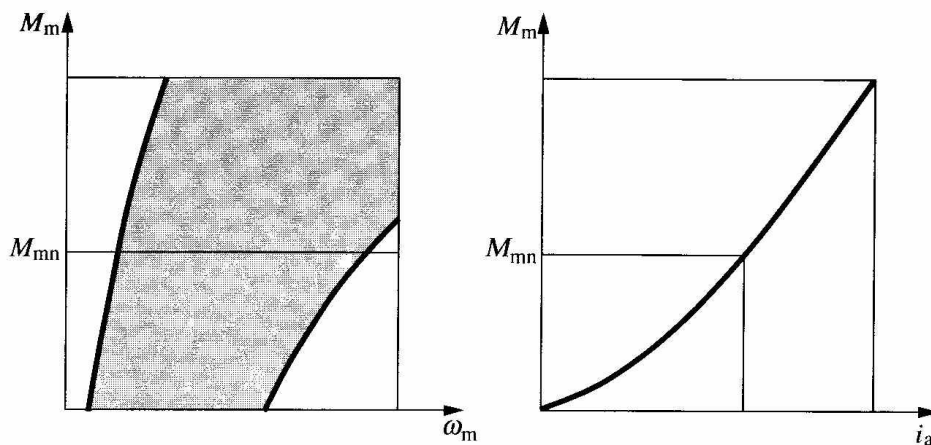
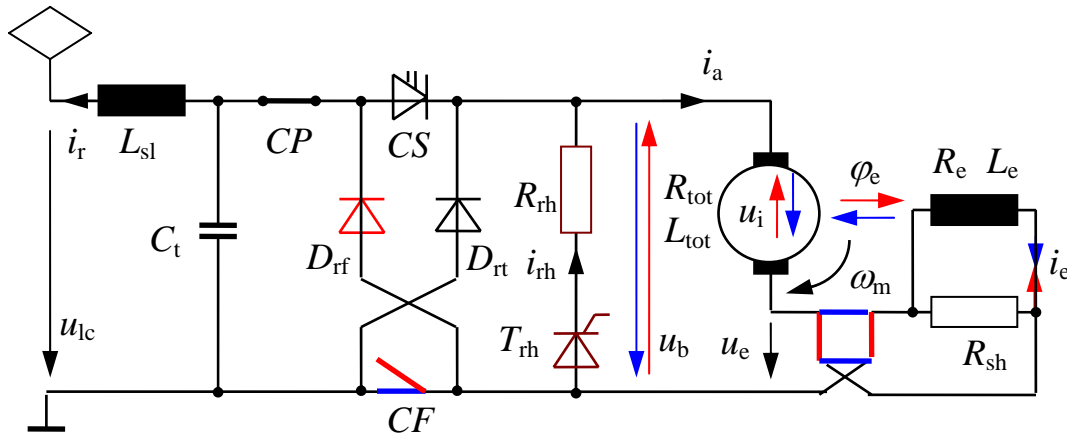


Fig. 4.90A Moteur à collecteur et hacheur: caractéristiques en freinage rhéostatique à excitation série.

L'inversion du flux de puissance peut aussi être obtenue par inversion du sens de la tension aux bornes. Dans ce cas, le même hacheur fonctionne en traction et en freinage : le contacteur CF est ouvert en mode freinage (Semaly : Metro A, Üstra : 6000, SZU : Be 4/4). La aussi, le thyristor  $T_{rh}$  ne conduit que la part de l'énergie qui ne peut pas être récupérée.



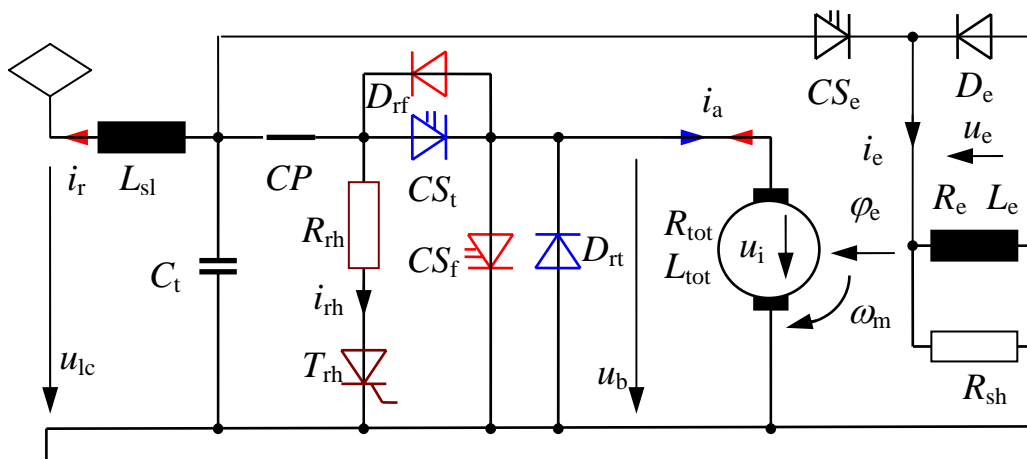
**Fig. 4.87A** Moteur à collecteur et hacheur: traction.

**Fig. 4.87B** Moteur à collecteur et hacheur: freinage à récupération à excitation série.

**Fig. 4.88A** Moteur à collecteur et hacheur: freinage rhéostatique à excitation série.

Les caractéristiques sont les mêmes (fig. 4.79, 4.85 et 4.90A).

Dans certaines applications, on a recours à l'excitation séparée par un hacheur spécifique  $CS_e$ . Si ce dernier est piloté en traction pour que le courant d'excitation suive le courant d'induit jusqu'à pleine ouverture du hacheur principal  $CS_t$ , on parle de *moteur à image série*. Lorsque  $CS_t$  est à pleine ouverture, on peut diminuer le courant d'excitation pour affaiblir le champ, ce qui élargit le domaine de fonctionnement du moteur (MOB: GDe 4/4). En freinage combiné, le thyristor  $T_{rh}$  n'est piloté que pour éliminer la part d'énergie de freinage qui ne peut pas être récupérée par le réseau. En freinage rhéostatique pur, le hacheur  $CS_f$  est inactif (ou absent), CP est ouvert et un contacteur électromécanique remplace souvent  $T_{rh}$ .



**Fig. 4.95** Moteur à collecteur et hacheur: traction à excitation séparée.

**Fig. 4.86A** Moteur à collecteur et hacheur: freinage à récupération à excitation séparée.

**Fig. 4.88C** Moteur à collecteur et hacheur: freinage rhéostatique à excitation séparée.

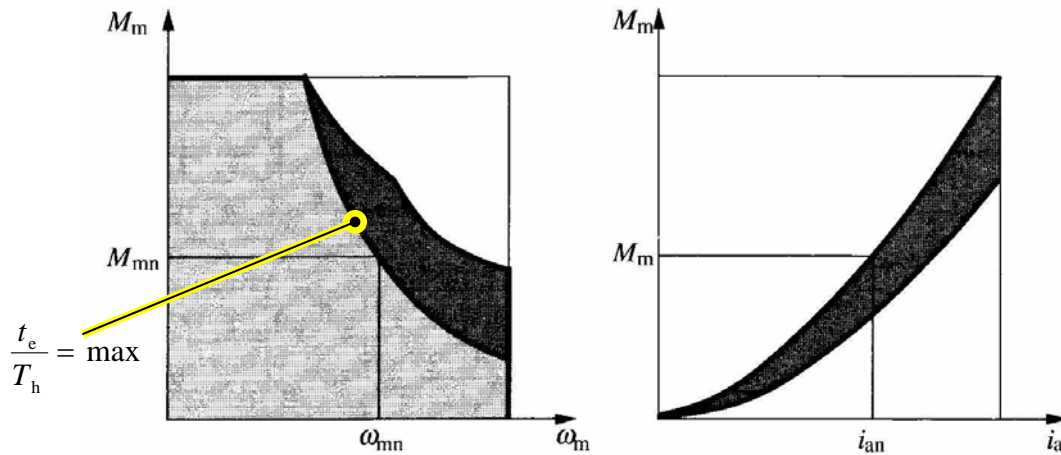


Fig. 4.97 Moteur à collecteur et hacheur: caractéristiques en traction à excitation séparée : « image série ».

On trouve aussi des commandes qui imposent un courant constant pour toute la plage de réglage du rapport cyclique du hacheur principal. Le courant d'excitation imposé peut être plus faible pour élargir la plage de fonctionnement (SJ : Rc4)

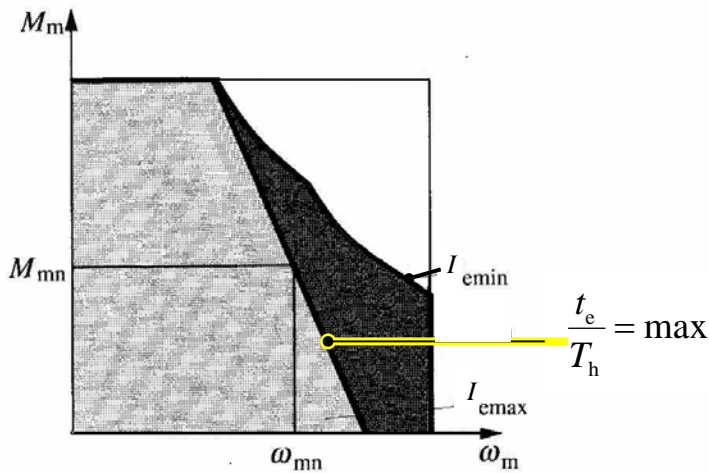


Fig. 4.97A Caractéristiques pour un moteur à collecteur alimenté par hacheur, avec excitation séparée constante.

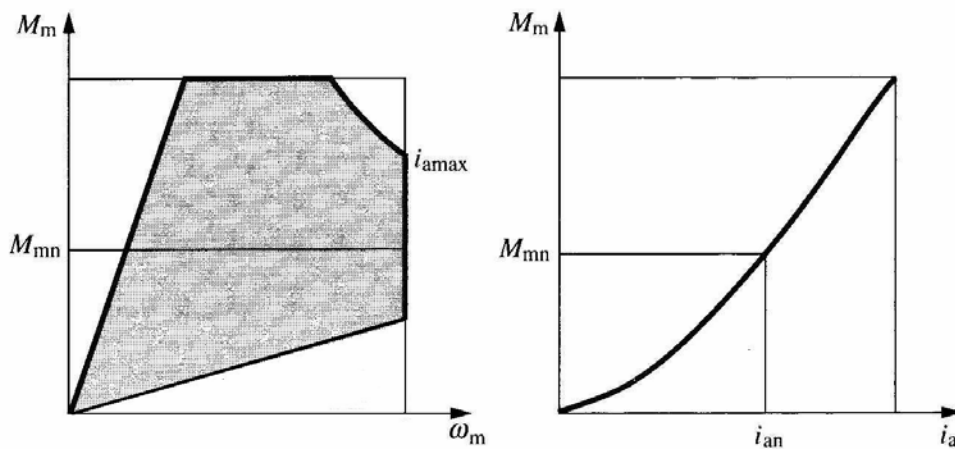
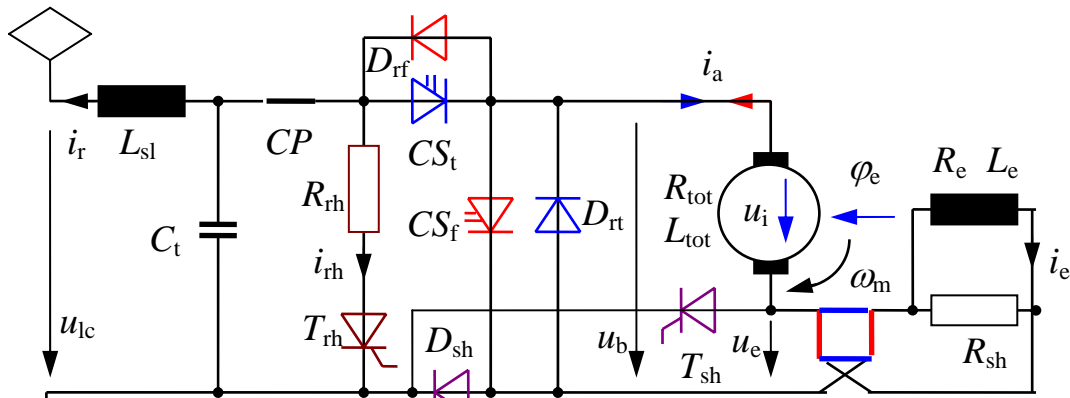


Fig. 4.90C Moteur à collecteur et hacheur: caractéristiques en freinage rhéostatique à excitation séparée.

En frein à récupération, la caractéristique est celle de la figure 4.85.

En excitation série, on peut aussi pratiquer l'affaiblissement du champ à l'aide d'un thyristor  $T_{sh}$  et d'une diode  $D_{sh}$  (SNCF: BB 7200). Le thyristor  $T_{sh}$  est enclenché pendant le temps de conduction du hacheur principal  $CS_t$ , en déviant le courant d'induit hors du circuit d'excitation. Au blocage de  $CS_t$ ,  $T_{sh}$  s'éteint naturellement.

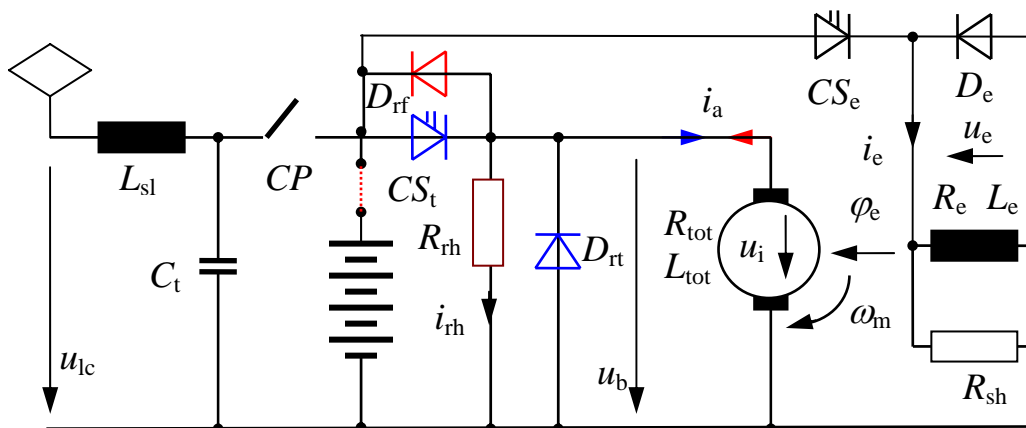


**Fig. 4.93** Moteur à collecteur et hacheur: traction avec affaiblissement du champ.

La caractéristique est celle de la figure 4.97.

Contrairement à la commande rhéostatique, la commande à hacheur ne dissipe pas de l'énergie dans une résistance, le rendement de la chaîne de traction en démarrage est donc bien meilleur. Il ne faut cependant pas négliger les pertes par commutation et conduction dans les semi-conducteurs. Les hacheurs les plus récents ont un rendement voisin de 98 % sur toute leur plage de fonctionnement, y compris à pleine ouverture. Le rendement des premiers hacheurs (1970 – 1980) n'atteignait pas 95 %. On sait qu'un moteur électrique dimensionné pour une certaine puissance nominale peut fournir pendant un temps court une puissance supérieure. Cette possibilité est largement utilisée pour les engins de traction à moteurs directs ou à commande à rhéostat. Les jonctions des semi-conducteurs ont des constantes de temps thermiques très courtes et une surcharge momentanée – quelques fractions de milliseconde déjà – aboutit très vite à une élévation de température exagérée avec destruction du composant. Le dimensionnement du hacheur devra donc correspondre à la puissance **maximale** du véhicule moteur, et non à sa puissance nominale comme les moteurs de traction.

En freinage rhéostatique, on a aussi pratiqué l'excitation shunt : l'énergie d'excitation est prélevée à l'enclenchement sur la batterie, puis en déviation du rhéostat (CSD : 363).

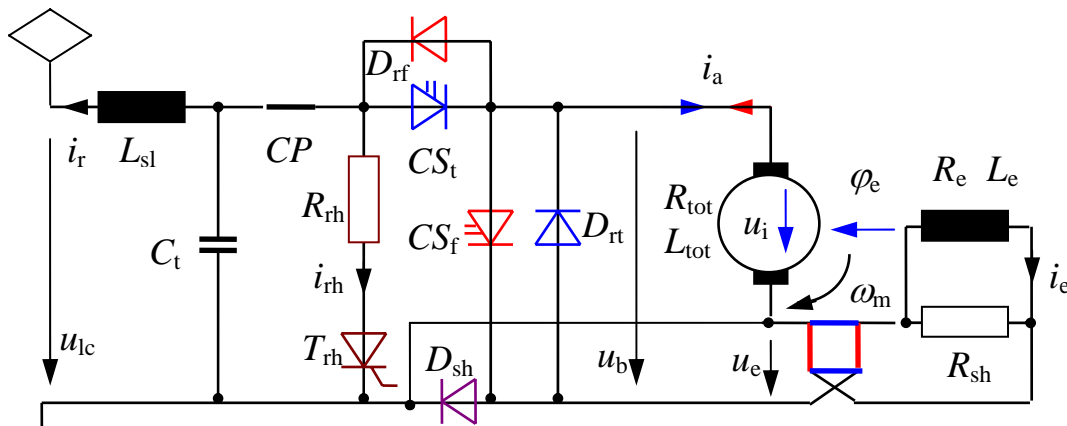


**Fig. 4.95** Moteur à collecteur et hacheur: traction à excitation séparée.

**Fig. 4.88B** Moteur à collecteur et hacheur: freinage rhéostatique à excitation shunt.

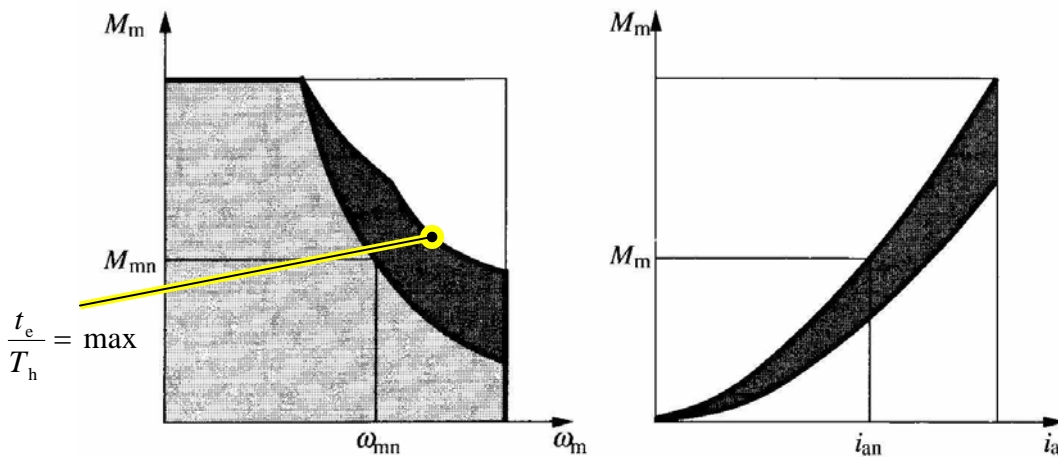
La caractéristique est la même qu'en excitation séparée (fig. 4.90C).

On a aussi pratiqué le montage à affaiblissement automatique du champ. Cela simplifie la commande par rapport à l'affaiblissement commandé : seul le hacheur principal doit être commandé. L'excitation est assurée par le courant d'induit pendant le temps de blocage du hacheur principal, si ce temps est très court, cela n'est pas suffisant pour garantir une excitation complète et le montage passe progressivement à champ affaibli.



**Fig. 4.98** Moteur à collecteur et hacheur: traction avec affaiblissement automatique du champ.

La caractéristique est semblable à la figure 4.97, mais la frontière entre plein champ et champ affaibli est très floue (NSStCM : Be 4/4). Ici, la limite de pleine ouverture correspond à la courbe enveloppe de la caractéristique.



**Fig. 4.97C** Moteur à collecteur et hacheur: caractéristiques en traction à affaiblissement automatique du champ.



Pour limiter l'ondulation due au hacheur, on entrelace des hacheurs élémentaires plutôt que les brancher en parallèle afin de conduire le courant nécessaire (SNCF : BB 7200).

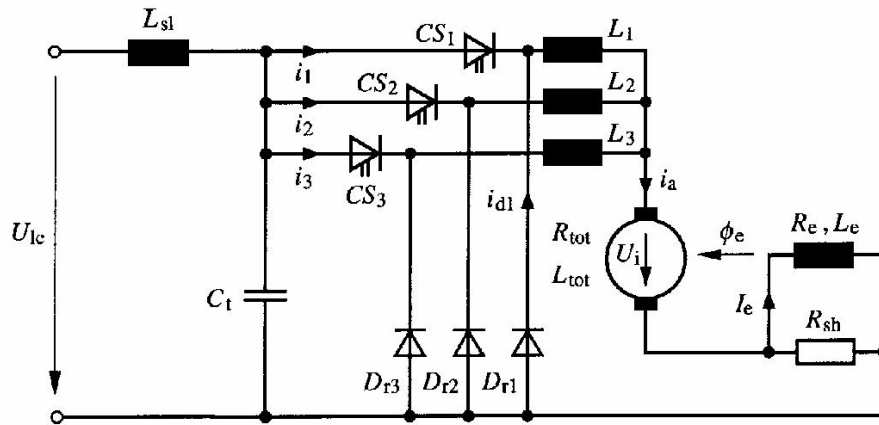


Fig. 4.102 Principe des hacheurs entrelacés.

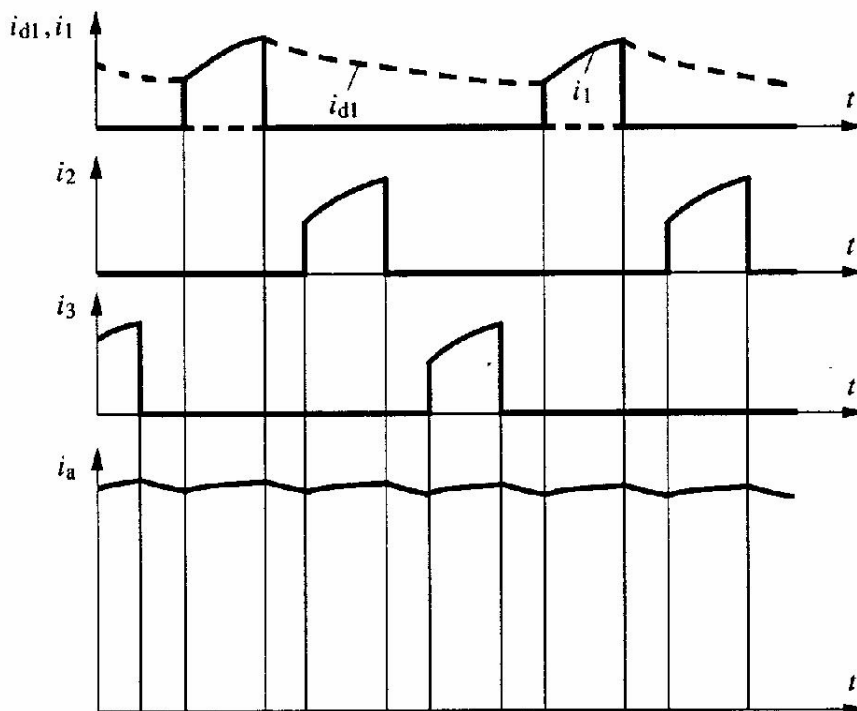


Fig. 4.103 Courants des hacheurs entrelacés et du moteur.

Le hacheur Vernier permet d'amortir le saut au démarrage avec le rapport cyclique minimal (SNCB : 27).

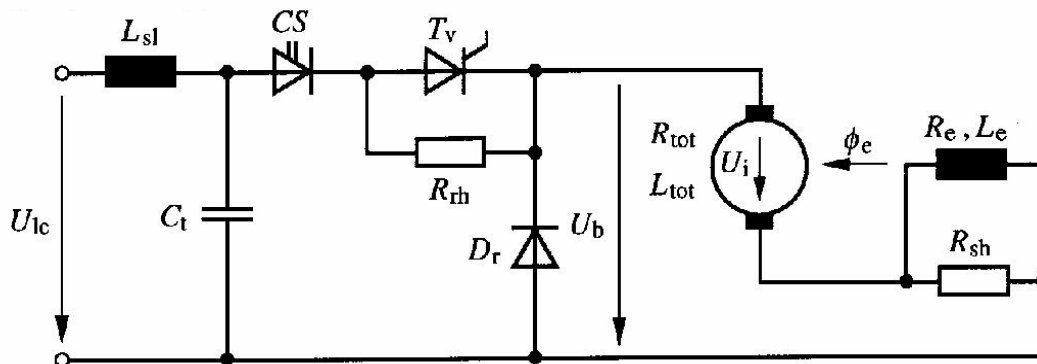


Fig. 4.104 Principe du hacheur Vernier.

Lorsque le véhicule circule la plupart du temps dans la zone à champ réduit du diagramme d'effort, on a pu recourir à la commande hybride : commande rhéostatique pour l'induit et excitation séparée à image série par hacheur.

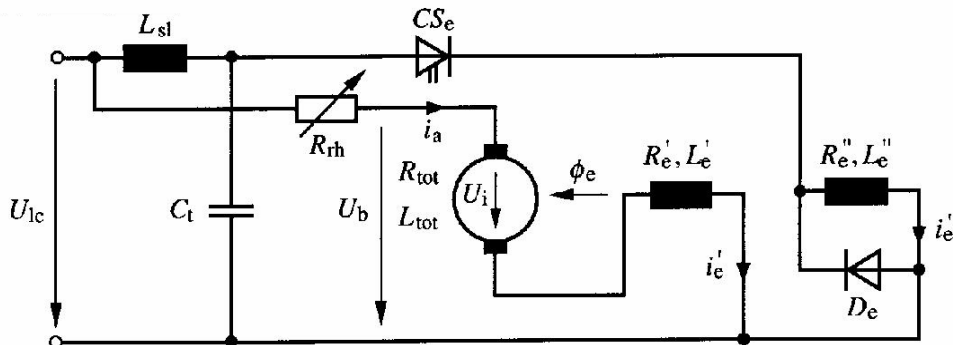


Fig. 4.105 Commande hybride : schéma de principe en traction (JNR : 215).

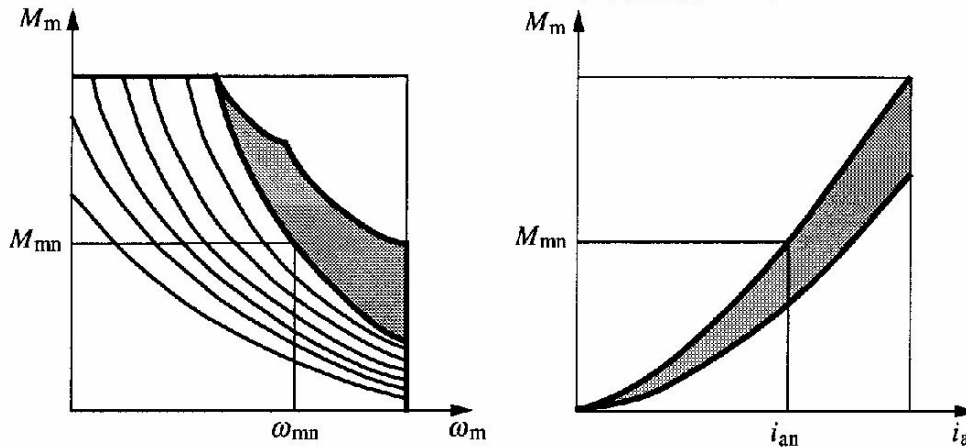


Fig. 4.106 Commande hybride : caractéristiques en traction.

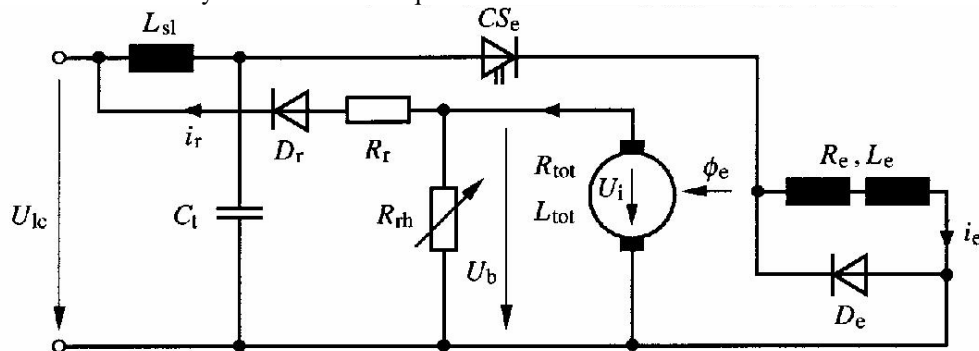


Fig. 4.108 Commande hybride : schéma de principe en freinage (BOB : ABeh 4/4 II).

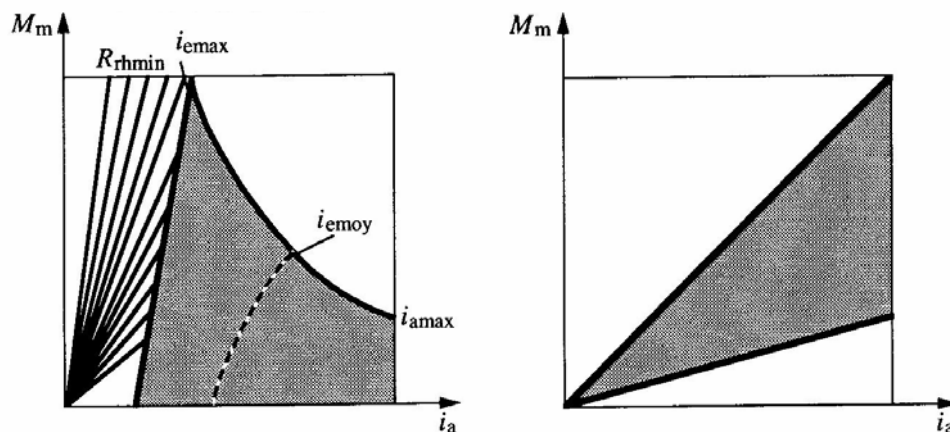


Fig. 4.111 Commande hybride : caractéristiques en freinage.

**Dimensionnements d’entraînement**

Les moteurs de traction sont dimensionnés pour une valeur de courant au régime continu ou nominal (●, avec limite en trait mixte bleu). On peut surcharger les moteurs pendant un certain temps en utilisant l’inertie thermique des organes métalliques de leur construction, sans risquer un échauffement excessif des parties les plus sensibles (hachures rouges sur le diagramme). Evidemment, plus le point de fonctionnement est éloigné de la limite du régime continu, plus le temps de fonctionnement doit être court avant d’atteindre l’échauffement maximal des composants.

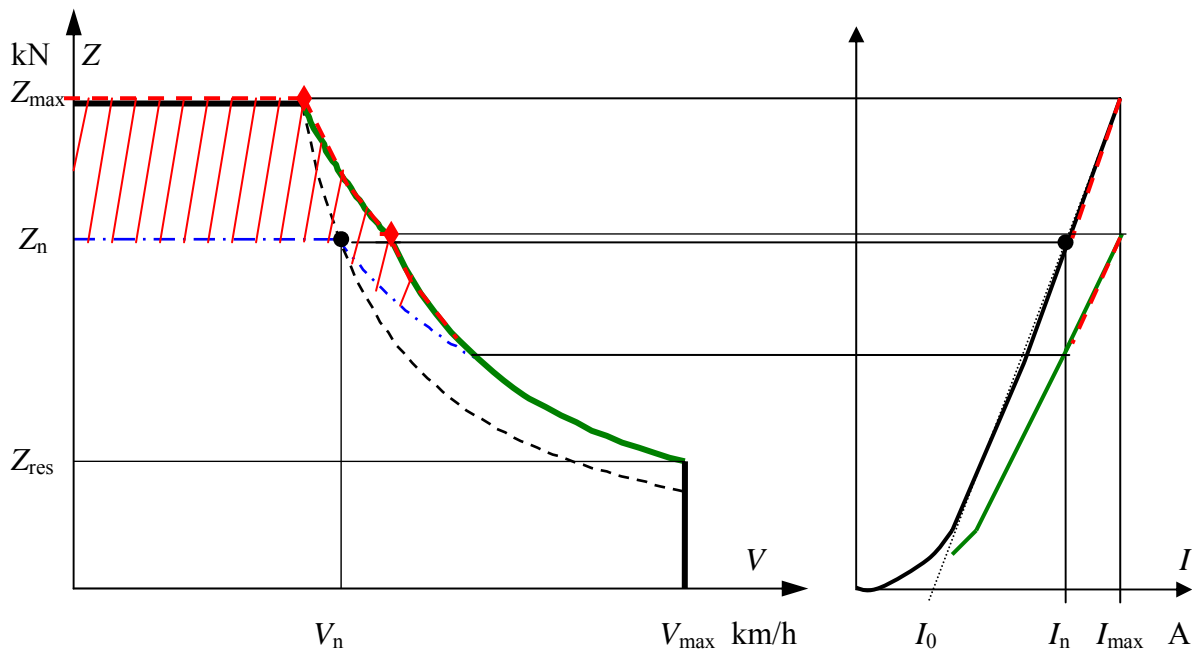
Après élimination du rhéostat de démarrage, les moteurs se trouvent au dernier cran plein champ (- - -). La tension aux bornes du groupe moteur est celle de la ligne de contact. Elle est environ constante. On écrit les équations simplifiées en régime établi :

$$U_{lc} = k_m I_a V - R_a I_a \qquad Z = k_t I_a - I_0$$

$$Z = k_t \frac{U_{lc}}{k_m V - R_a} - I_0$$

A champ affaibli, la caractéristique de couple est un peu plus basse (en vert sur les caractéristiques).

Dans les entraînements à hacheurs, la limite plein champ (- - -) correspond au rapport cyclique maximal (~100%) du hacheur principal. Pour les dispositifs à semiconducteurs, donc les hacheurs, il n’y a pas d’inertie thermique. Le hacheur doit donc être dimensionné pour la puissance maximale de la caractéristique (♦ - - ♦).



**Fig. 4.97B** Caractéristiques pour un moteur série alimenté par hacheur.



### 4.4 Moteur à collecteur et redresseur

Le moteur à collecteur peut être alimenté depuis une ligne de contact monophasée à travers un redresseur, push-pull puis en pont à diodes. Le moteur peut dans ce cas être de construction semblable à celle d'un moteur commandé par hacheur, sans les sophistications propres au moteur direct. Dans les premières applications, le redresseur est fixe et la tension est réglée par transformateur à gradin (BLS: Re 4/4, SNCF: BB 16500). En freinage, le redresseur règle le courant d'excitation – à une tension beaucoup plus faible qu'en traction – et l'induit du moteur débite sur un rhéostat fixe (CFR: 060-EA).

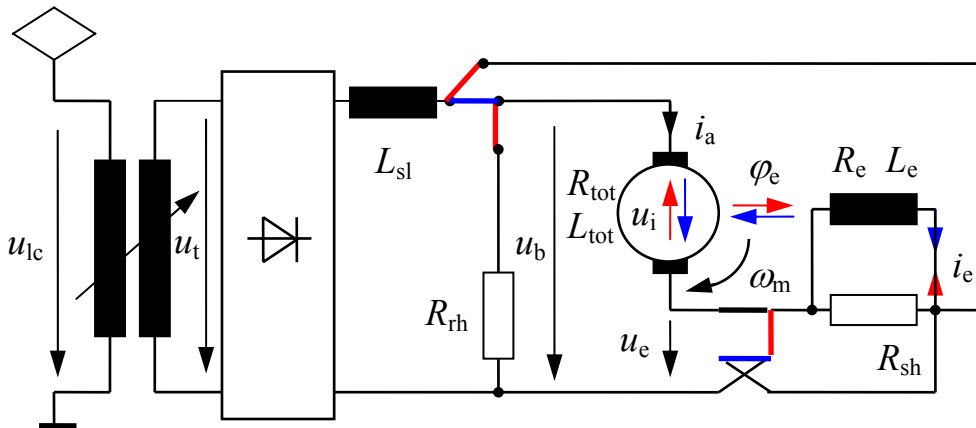


Fig. 4.112 Moteur à collecteur à tension redressée en traction.

Fig. 4.119 Moteur à collecteur alimenté via redresseur: freinage rhéostatique à excitation séparée.

Le courant dans le transformateur est en phase avec la tension, mais de forme approximativement rectangulaire si l'inductance du moteur est élevée. La déformation des caractéristiques à basse vitesse ne s'observe pas ici comme sur le moteur direct.

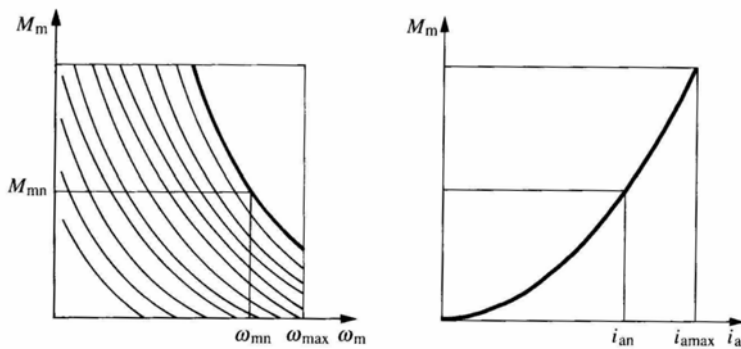


Fig. 4.118 Moteur redressé en traction: caractéristiques en fonction du courant et de la vitesse.

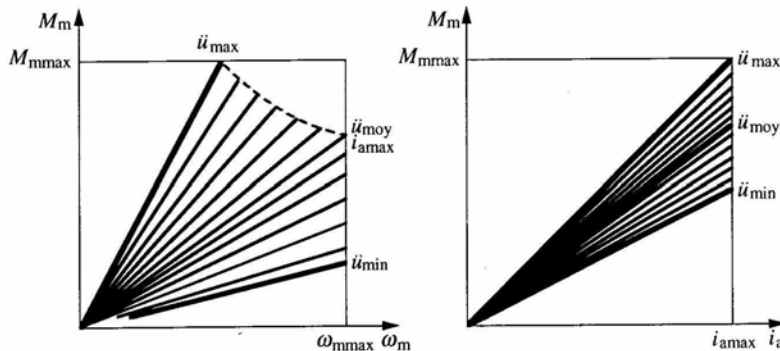
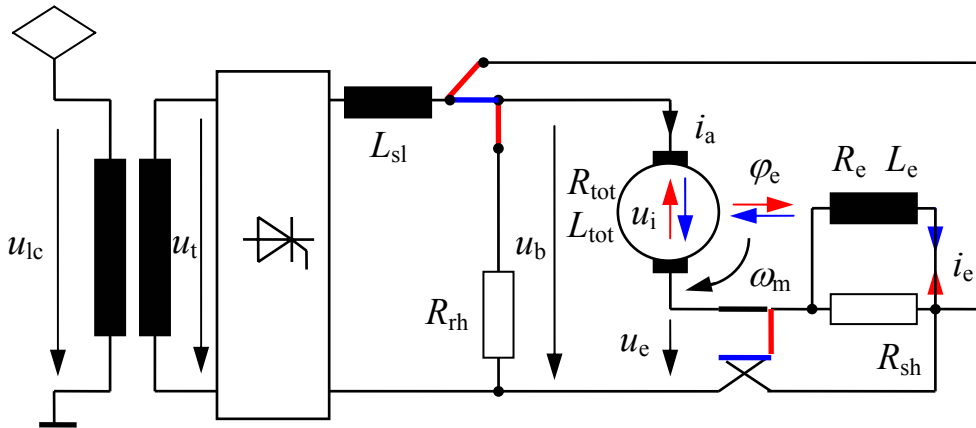


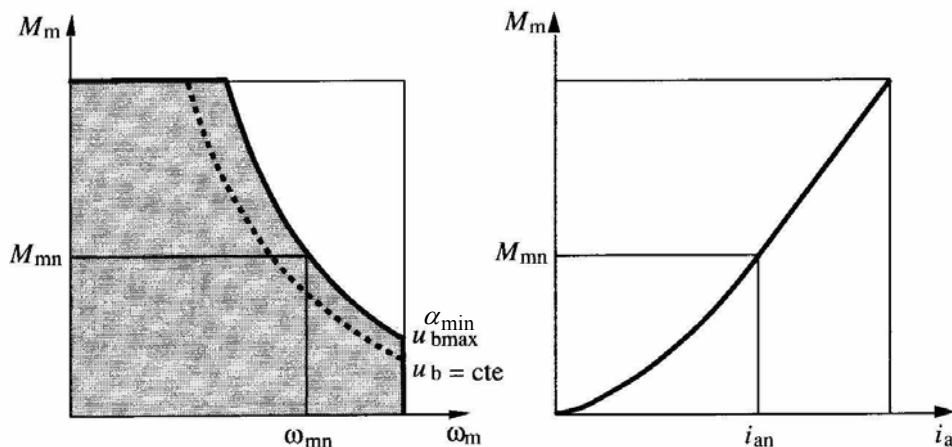
Fig. 4.121 Moteur redressé en freinage rhéostatique: caractéristiques en fonction du courant et de la vitesse.

Le développement des semi-conducteurs a permis de réaliser des redresseurs commandés, la tension de sortie étant déterminée par l'angle d'ouverture des thyristors. On peut ainsi avoir un ajustage du point de fonctionnement sans discontinuité. Le pont peut être complet (CFF Ee 3/3 16502) ou mixte (SNCF CC 21000). Le rapport du transformateur est alors fixe. En freinage, le redresseur règle le courant d'excitation (RAG : EA1000).

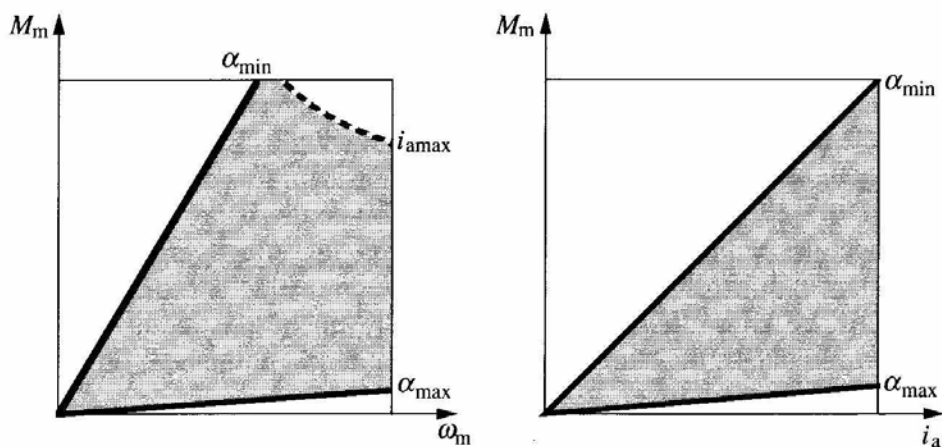


**Fig. 4.122** Moteur à collecteur à tension redressée en traction.

**Fig. 4.133** Moteur à collecteur alimenté via redresseur: freinage rhéostatique à excitation séparée.



**Fig. 4.129** Moteur redressé en traction: caractéristiques en fonction du courant et de la vitesse.



**Fig. 4.136** Moteur redressé en freinage rhéostatique: caractéristiques en fonction du courant et de la vitesse.

On a représenté les montages simples de redresseurs, tels qu'ils ont été appliqués dans les réalisations pionnières. On verra plus loin des réalisations à thyristors plus complexes destinées à limiter la composante réactive et les harmoniques à la ligne de contact.

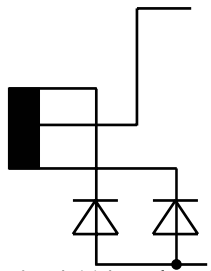


Fig. 4.114 Push-pull.

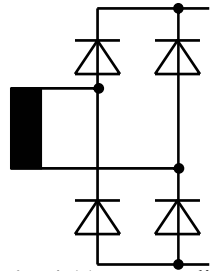


Fig. 4.115 Pont à diodes.

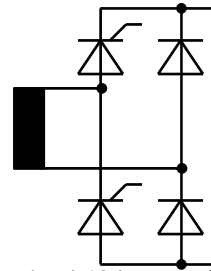


Fig. 4.124 Pont mixte.

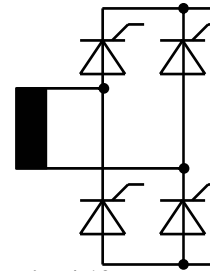


Fig. 4.125 Pont complet.

Avec un pont complet, on peut avoir un frein à récupération (CFF : Ee 3/3 II).

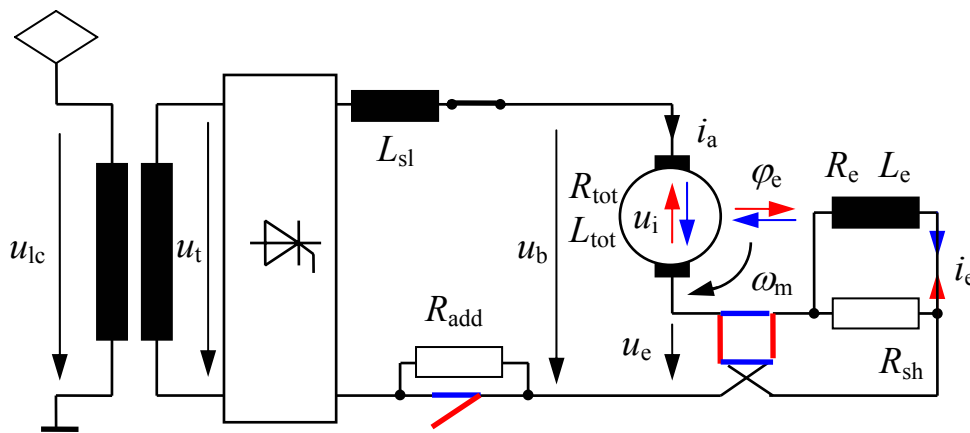


Fig. 4.122 Moteur à collecteur à tension redressée en traction.

Fig. 4.130 Moteur à collecteur alimenté via redresseur: freinage récupération à excitation série.

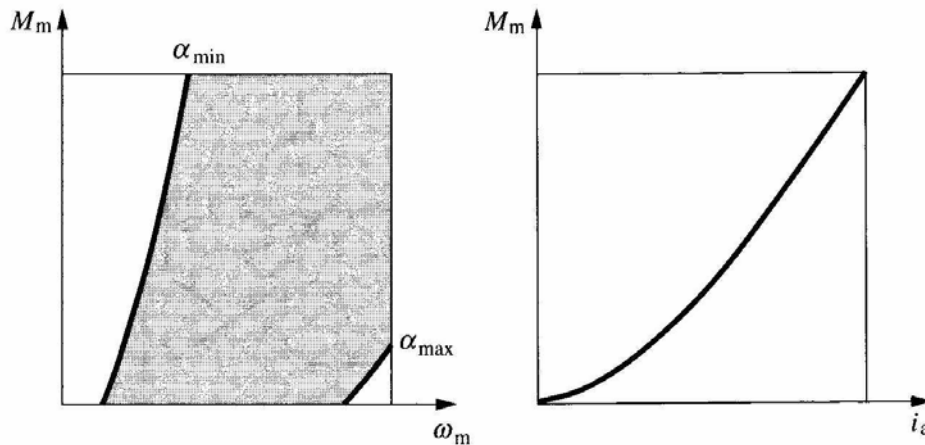


Fig. 4.132 Moteur redressé en freinage à récupération: caractéristiques en fonction du courant et de la vitesse.

Pour limiter les effets sur le réseau d'alimentation, on a adopté des ponts à deux niveaux (Fig. 4.139), à 3 niveaux (Fig. 4.139A) ou à 4 niveaux (Fig. 4.140). Dans ces solutions, le réglage par l'angle d'allumage n'a lieu que sur un niveau (pont I), les autres étant soit bloqués soit à pleine ouverture. Comme pour les moteurs alimentés par tension continue, on peut avoir recours à l'affaiblissement du champ pour étendre leur plage de fonctionnement (Fig. 4.142). Une solution a recours à des thyristors auxiliaires  $T_{sh}$  qui sont enclenchés pendant la phase de conduction de la branche correspondante du pont principal.

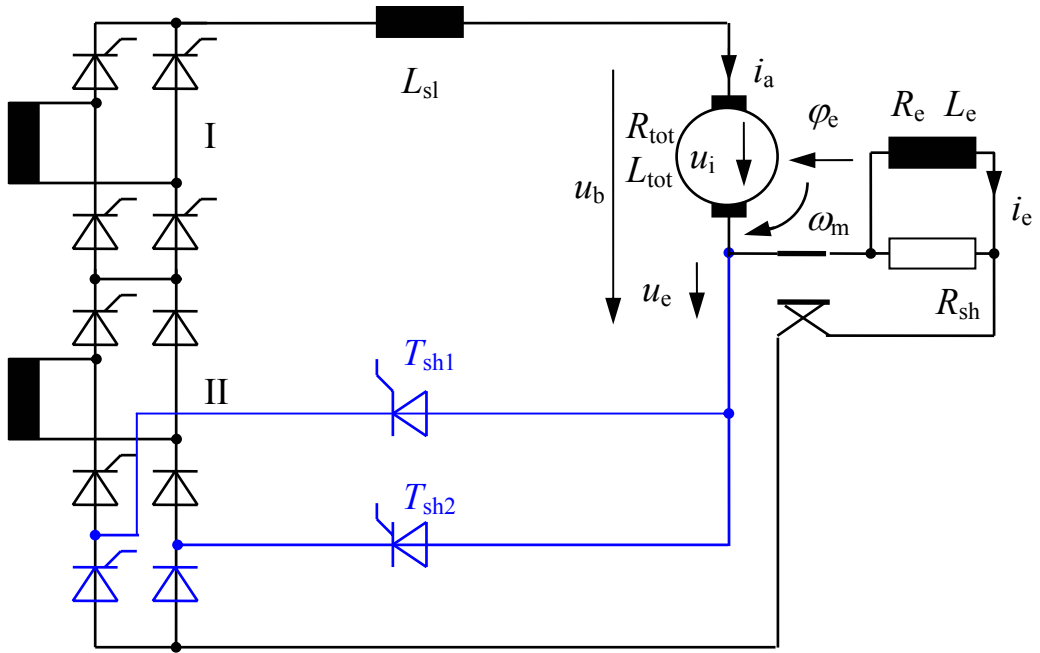


Fig. 4.139 Pont à deux niveaux.

Fig. 4.142 Pont à deux niveaux avec affaiblissement du champ (SNCF : BB 15000).

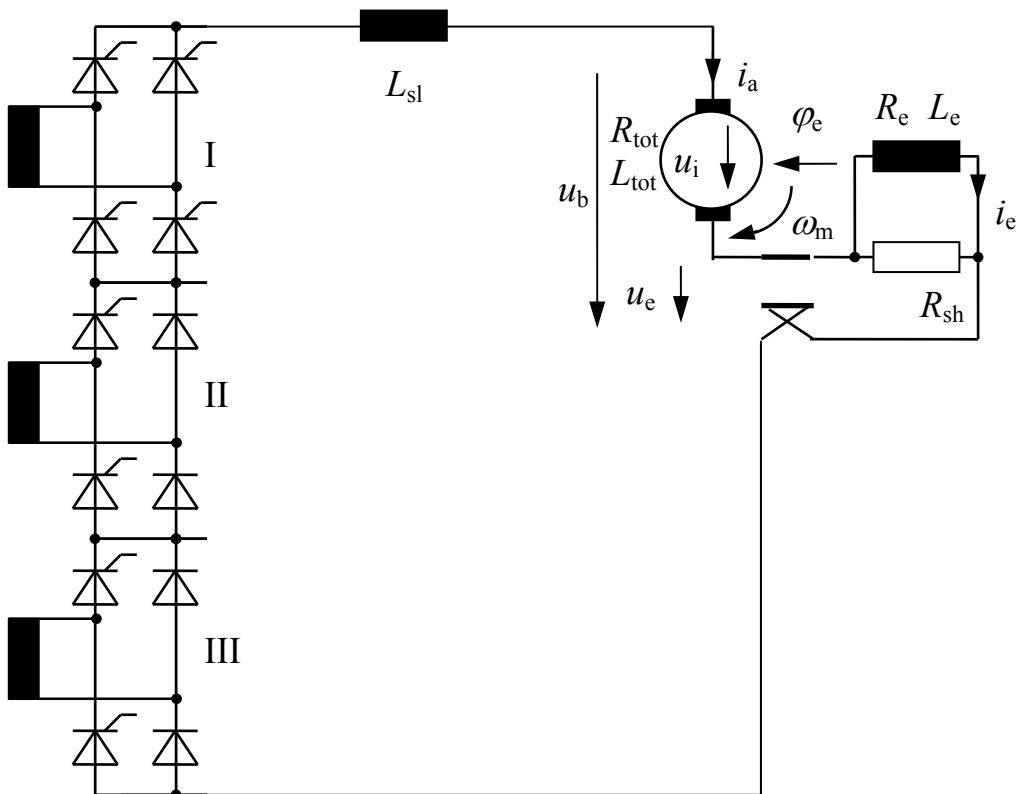


Fig. 4.139 A Pont à trois niveaux (SJ : Rc 1).



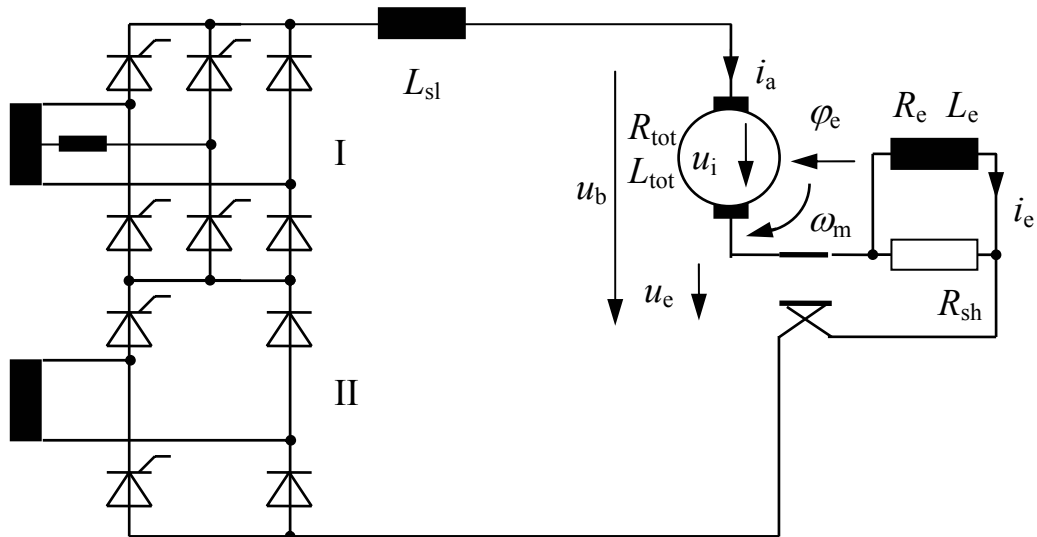


Fig. 4.140 Pont à 4 niveaux en montage économique (ÖBB : 1044).

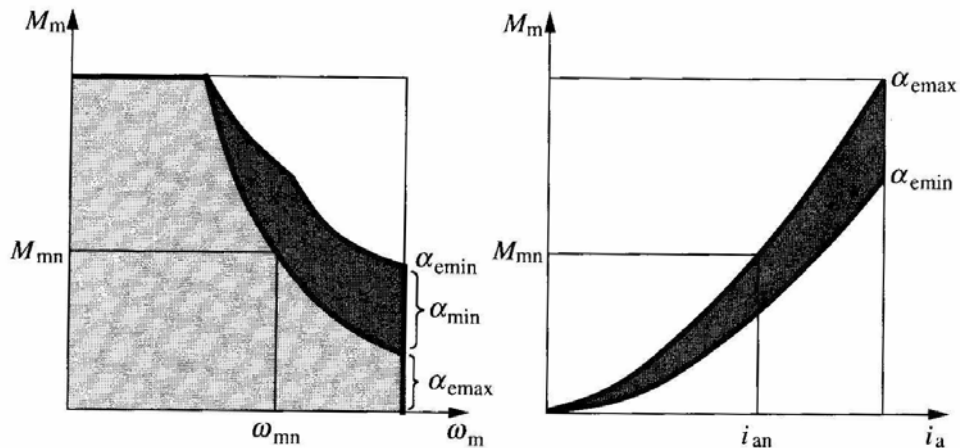


Fig. 4.143 Caractéristiques en traction avec affaiblissement du champ.

Tant en traction qu'en freinage on peut adopter l'excitation séparée par un autre secondaire du transformateur et un autre redresseur. On peut commander le redresseur d'excitation (II) pour que le courant  $i_e$  qui produit le champ suive le courant d'induit jusqu'à pleine ouverture du pont principal (I), dans ce cas on parle de moteur à image série (RhB : Be 4/4). La caractéristique de couple est aussi donnée ci-dessus (Fig. 4.143). On peut aussi commander un courant d'excitation constant d'induit jusqu'à pleine ouverture du pont principal (SJ : X1). Dans les deux cas, on obtient l'affaiblissement de champ par augmentation de l'angle d'ouverture du pont II. En freinage, le pont principal I est piloté en onduleur et le pont II règle le courant d'excitation de manière à garantir une tension induite suffisante même à basse vitesse.

On peut aussi avoir deux enroulements d'excitation : un en série et l'autre alimenté par pont séparé. On parle ici d'excitation composite (CFF : RBDe 4/4). A champ minimum, seul l'enroulement série est parcouru par le courant d'induit, le pont II est bloqué.

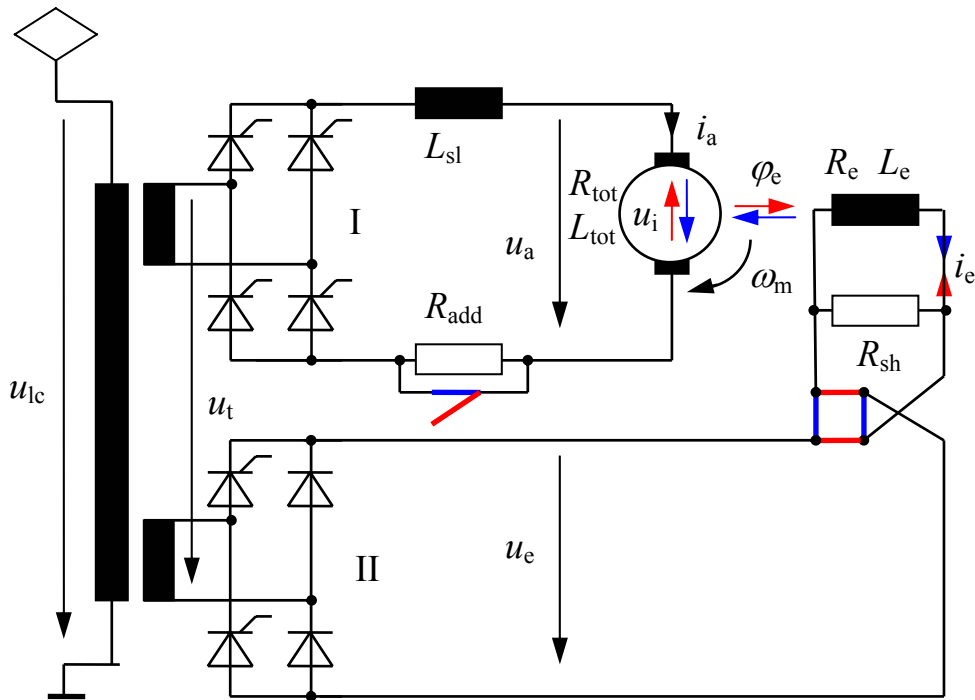


Fig. 4.145 Moteur redressé à excitation séparée: en traction et en freinage à récupération.

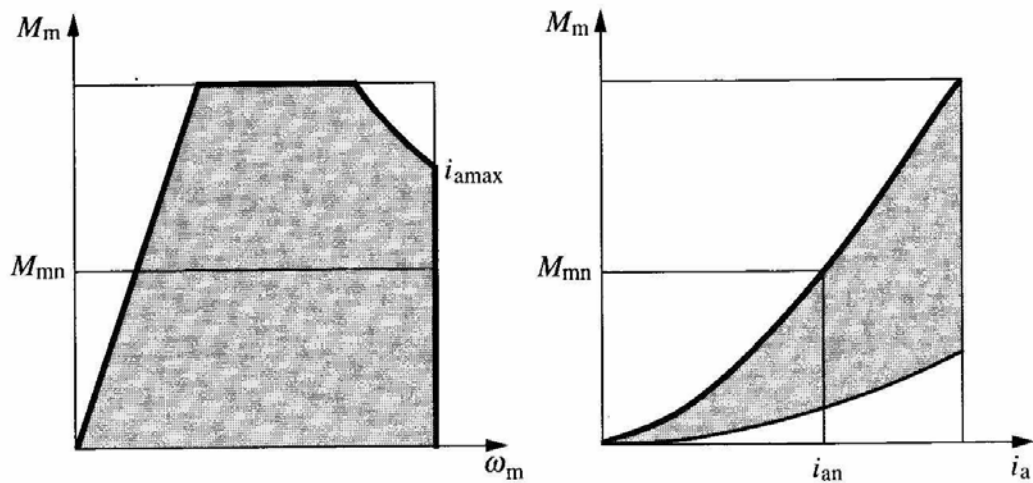


Fig. 4.147 Moteur redressé en freinage à récupération, excitation séparée: caractéristiques en fonction du courant et de la vitesse.

Le redresseur, tout comme le hacheur (sect.4.3) doit être dimensionné pour la puissance maximale des moteurs qu'il alimente, et non pour leur puissance nominale.

Si le courant d'excitation séparée est constant, sauf pour les vitesses élevées, les caractéristiques de traction sont un peu différentes.

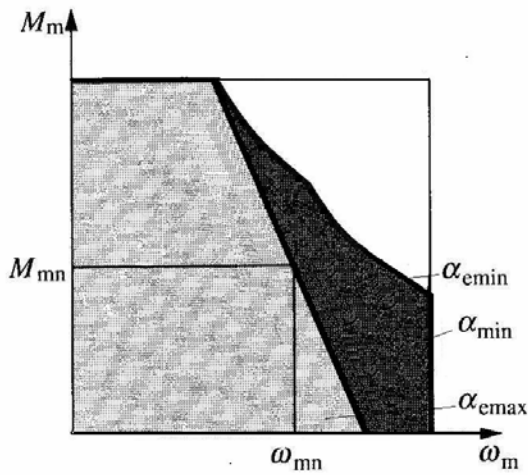


Fig. 4.143A Caractéristiques en traction avec affaiblissement du champ : excitation séparée.

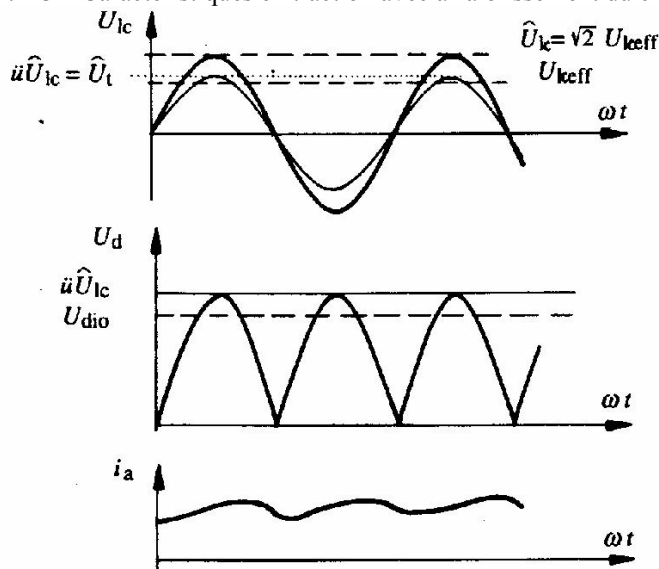


Fig. 4.113 Moteur à tension redressée : allure du courant moteur et des tensions, redresseur à diodes.

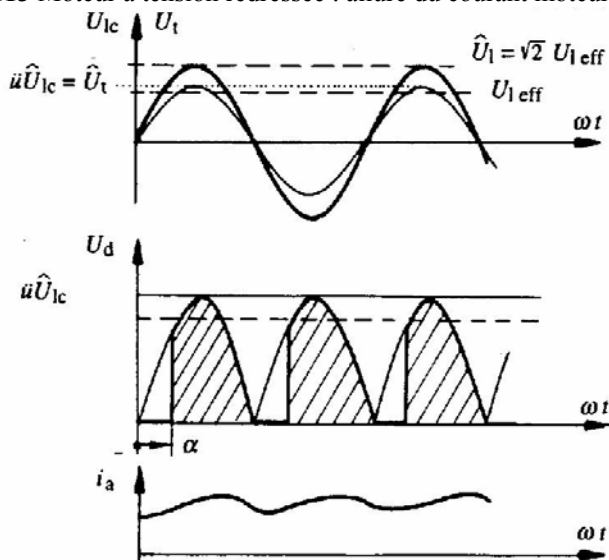


Fig. 4.123 Moteur à tension redressée : allure du courant moteur et des tensions, redresseur à thyristors.

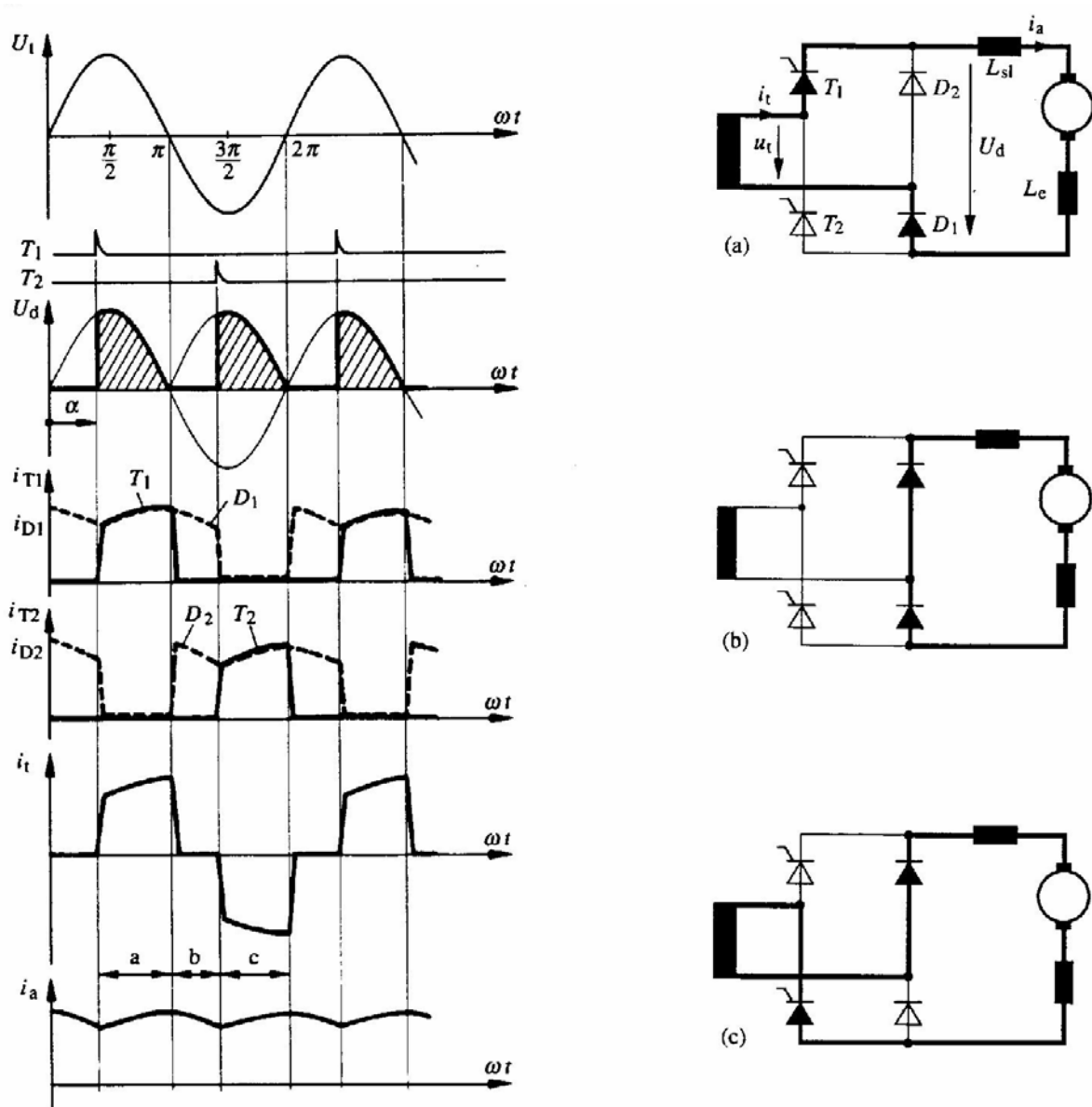


Fig. 4.126 Moteur à tension redressée : allure des courants et des tensions, pont mixte.

On discerne bien le déphasage entre la tension  $u_t$  au secondaire du transformateur et le courant  $i_t$  qui traverse cet enroulement. On en déduit que cela occasionne un transit de puissance réactive dans la ligne de contact et le réseau d'alimentation du chemin de fer, occasionnant des pertes et des échauffements. Pour limiter ces inconvénients, on a adopté des montages plus complexes (fig.4.140) qui permettent une diminution de la puissance réactive d'un facteur 4 pour une même puissance active (fig. 4.141).

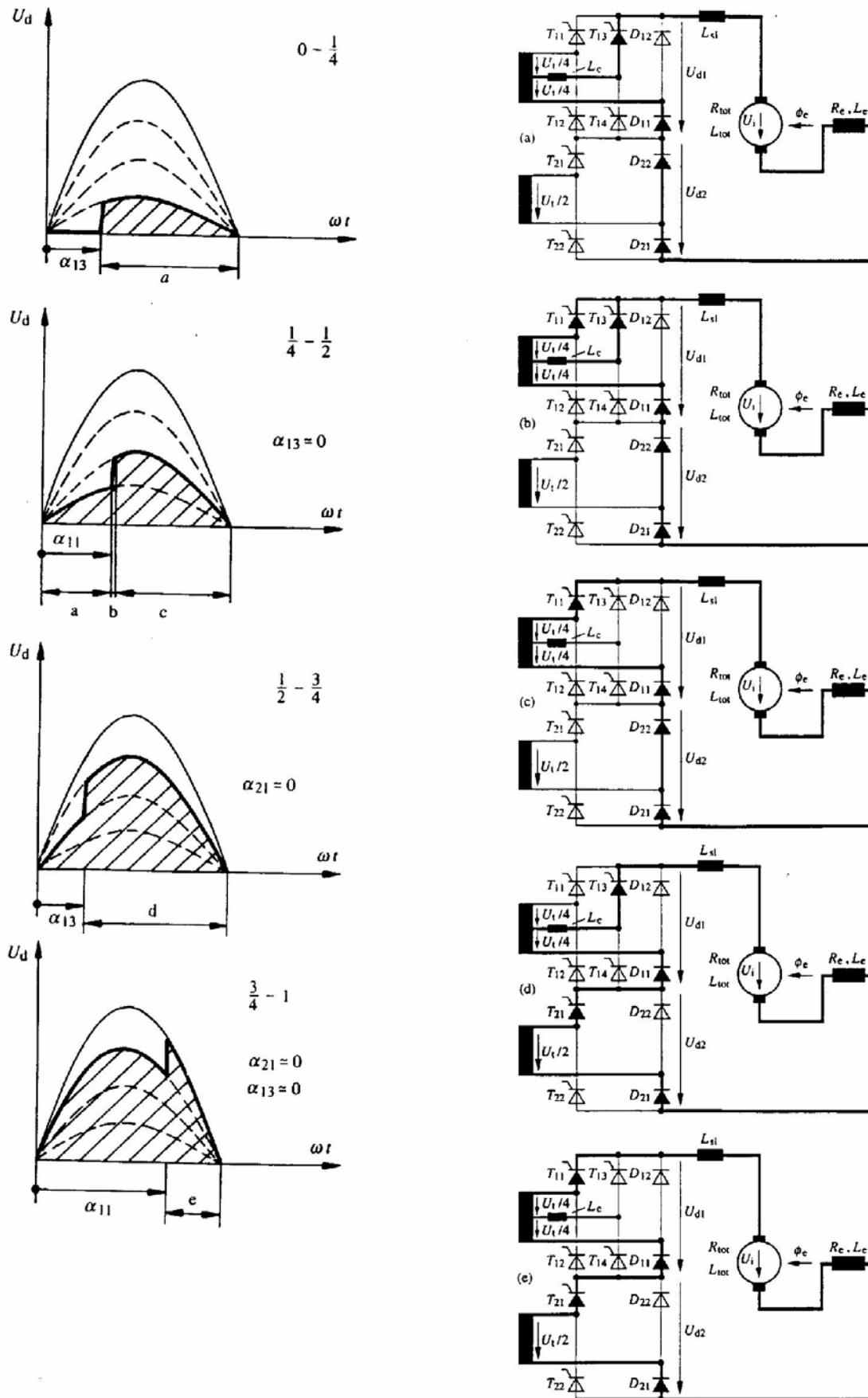


Fig. 4.141 Moteur à tension redressée : allure des courants et des tensions, pont à quatre niveaux.

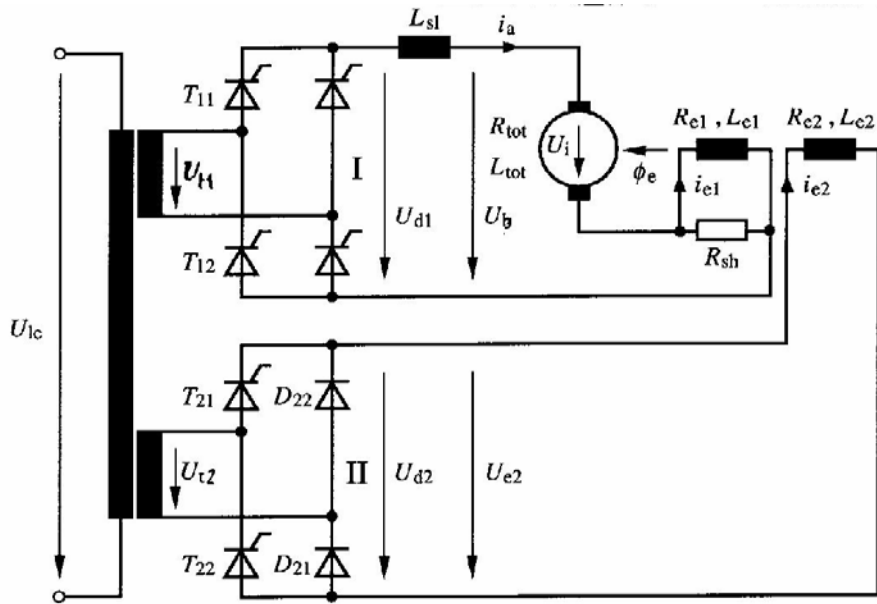


Fig. 4.148 Moteur à excitation mixte.

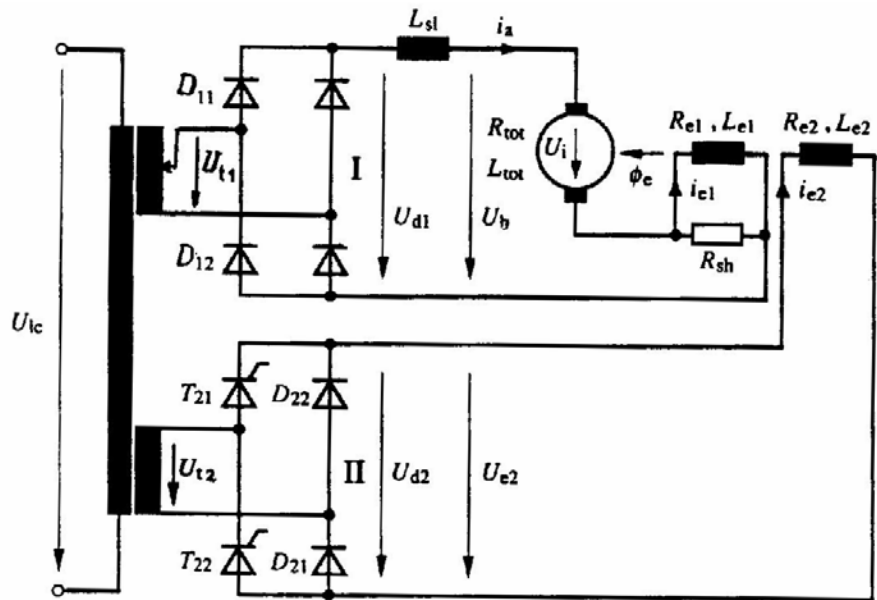


Fig. 4.148A Moteur à excitation mixte : commande hybride.

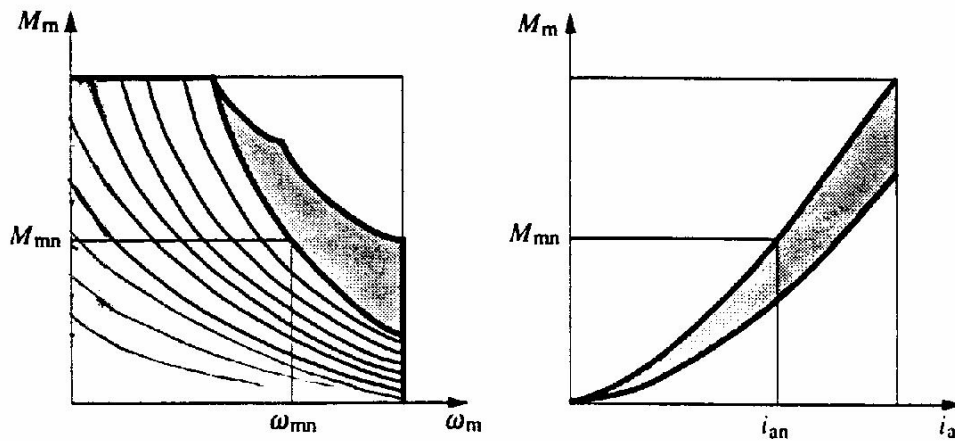


Fig. 4.148B Moteur à excitation mixte : commande hybride, caractéristique.

## Dimensionnements d'entraînement

Les moteurs de traction sont dimensionnés pour une valeur de courant au régime continu ou nominal (●, avec limite en trait mixte bleu). On peut surcharger les moteurs pendant un certain temps en utilisant l'inertie thermique des organes métalliques de leur construction, sans risquer un échauffement excessif des parties les plus sensibles (hachures rouges sur le diagramme). Evidemment, plus le point de fonctionnement est éloigné de la limite du régime continu, plus le temps de fonctionnement doit être court avant d'atteindre l'échauffement maximal des composants.

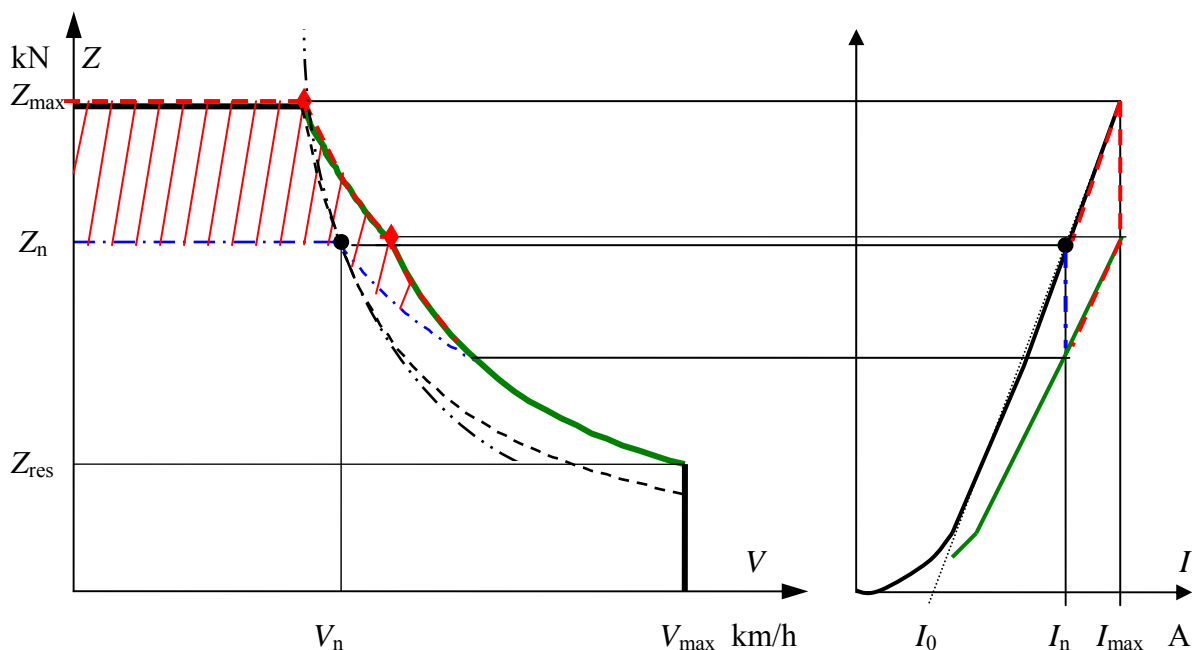
Avec le rapport de transformation le plus faible, les moteurs se trouvent au dernier cran plein champ ( - - - - ). La tension aux bornes du groupe moteur est celle du secondaire du transformateur suivi du redresseur :  $U_d$ . Elle est environ constante, mais pas tout-à-fait, car le transformateur n'est pas une source de tension idéale et a ses propres pertes. Par comparaison, on a tracé la courbe à tension aux bornes constante ( - - - - ) telle qu'obtenue au banc d'essai du constructeur. On écrit les équations simplifiées en régime établi :

$$U_d = k_m I_a V - R_a I_a \quad Z = k_t I_a - I_0 \quad Z = k_t \frac{U_d}{k_m V - R_a} - I_0$$

A champ affaibli, la caractéristique de couple en fonction du courant est un peu plus basse et déplacée vers la droite en fonction de la vitesse (en vert sur les caractéristiques).

Dans les entraînements à convertisseurs de courant, la limite plein champ ( - - - - ) correspond à l'angle d'ouverture minimal ( $\sim 0^\circ$ ) du redresseur principal. Pour les dispositifs à semiconducteurs, donc les redresseurs, il n'y a pas d'inertie thermique. Le convertisseur doit donc être dimensionné pour la puissance maximale de la caractéristique (♦ - - ♦).

Dans bien des cas d'exploitation, l'engin de traction circule la majorité du temps à un régime bien plus bas que le régime nominal. Compte tenu de la grande inertie thermique du transformateur, on peut se permettre alors de dimensionner celui-ci pour une puissance de régime continu plus faible que celles cumulées des moteurs de traction. Contre-exemple : trafic de banlieue.



**Fig. 4.143B** Caractéristiques pour un moteur série alimenté par redresseur commandé.





## 4.5 Moteur asynchrone

Malgré sa simplicité de fabrication, le moteur asynchrone n'a pu trouver son essor en traction électrique que par le développement de l'électronique de puissance qui a permis de créer un système triphasé de tensions à fréquence variable à partir d'une tension continue : ligne de contact ou circuit intermédiaire. A la figure 4.164, on a présenté le schéma de principe – à circuit intermédiaire à tension continue – pour les réalisations dès de 1990. Chaque branche contient deux contacteurs statiques qui pulsent la tension  $u_d$  pour former une onde sinusoïdale (et des harmoniques). Pour limiter les harmoniques, la fréquence de pulsation doit être au moins 20 fois supérieure à la plus grande fréquence du réseau triphasé. Auparavant, avec les semi-conducteurs des premières génération, on avait aussi adopté des réalisations avec circuit intermédiaire à courant continu et des onduleurs à commutation de phase. Dans ces premières réalisations, il était nécessaire d'intercaler un hacheur entre la ligne de contact et la tension d'alimentation du convertisseur triphasé. L'évolution de l'architecture et du mode de commande d'une branche – encadrée en trait mixte à la figure 4.164 – sera exposée plus loin.

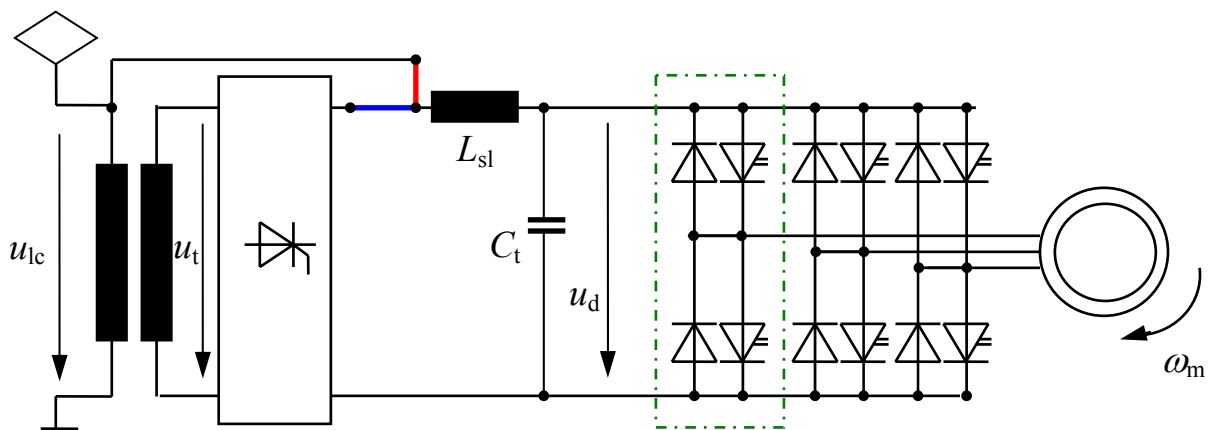


Fig. 4.164A Moteur asynchrone et convertisseur triphasé pour ligne de contact à **tension continue** ou **monophasée**. Schéma de principe.

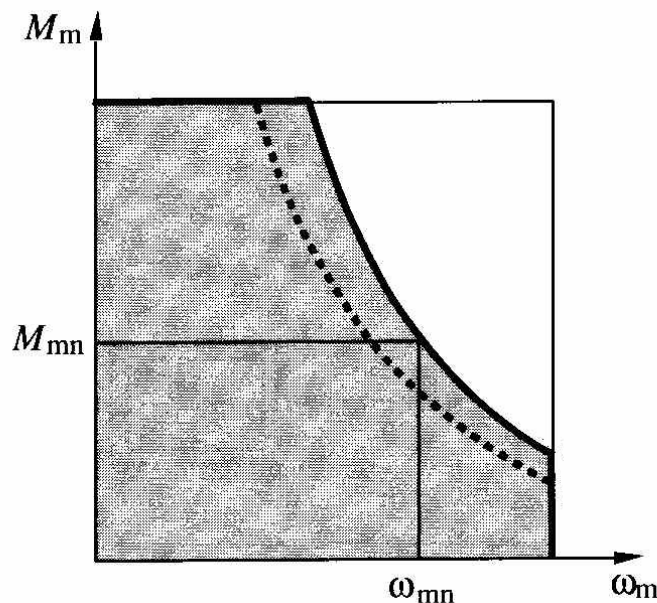


Fig. 4.164B Moteur asynchrone et convertisseur triphasé: caractéristiques en fonction de la vitesse.

Non seulement le moteur asynchrone a une complexité moindre que celle du moteur à courant continu – pas de collecteur – mais sa puissance massique est plus élevée. Par ailleurs, il ne nécessite pas de contacteurs de changement de couplage pour passer de traction à freinage :

- Si la fréquence du convertisseur est plus grande que la vitesse de la machine asynchrone, celle-ci fonctionne en mode moteur et le convertisseur en onduleur. C'est le régime traction.
- Si la fréquence du convertisseur est plus faible que la vitesse de la machine asynchrone, celle-ci fonctionne en mode générateur et le convertisseur en redresseur. C'est le régime freinage.

En monophasé, pour le régime de freinage à récupération, le pont monophasé côté ligne de contact doit être apte à fonctionner en onduleur. Pour le freinage rhéostatique, il faut compléter le schéma par une résistance et un contacteur statique qui permettent de transformer sur place la puissance de freinage en puissance thermique.

Avec les thyristors classiques, pour pratiquer la commutation forcée, il fallait installer un circuit d'extinction formé de thyristors, self et condensateurs. Les GTO, grâce à leur faculté de pouvoir être éteints par une impulsion négative sur leur gâchette, on permis une singulière simplification du schéma d'une branche. L'augmentation de la tension de blocage et du courant de conduction pour un seul GTO a permis une poursuite de la simplification. Les IGBT ont suivi la même progression, mais avec retard. Ce n'est que plus récemment qu'on a pu les appliquer aux puissances élevées. Leur commande en tension nécessite des puissances beaucoup plus faibles que celles des GTO, en outre, leurs pertes en conduction et en commutation sont plus faibles. Contrairement aux GTO, les IGBT peuvent être montés en parallèle sans difficulté.

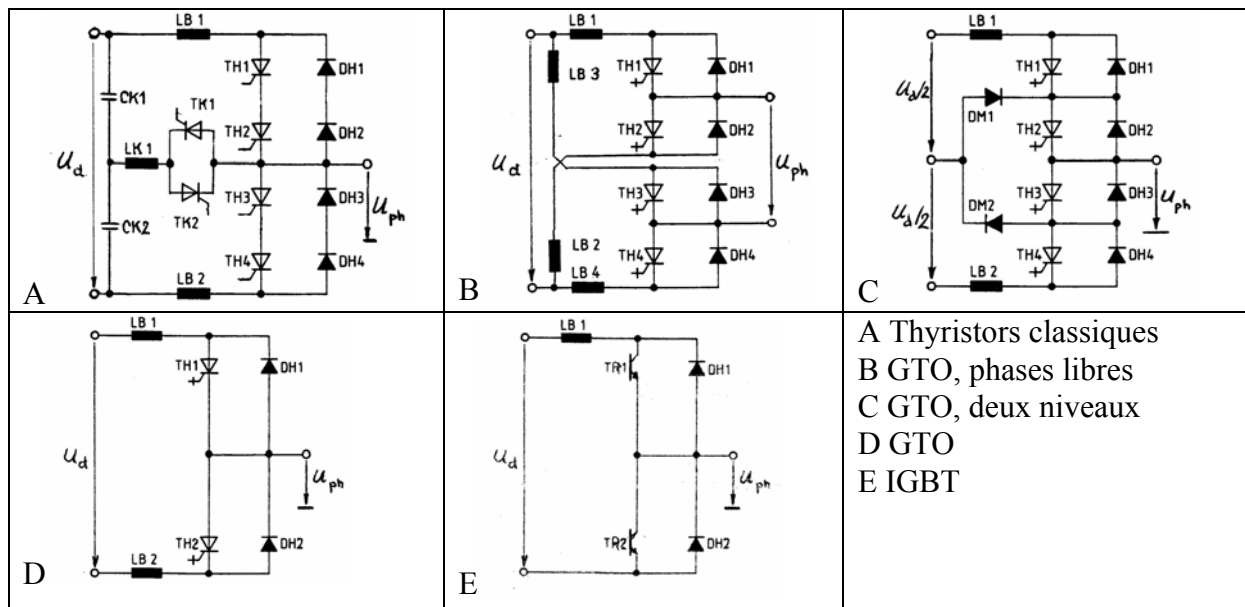
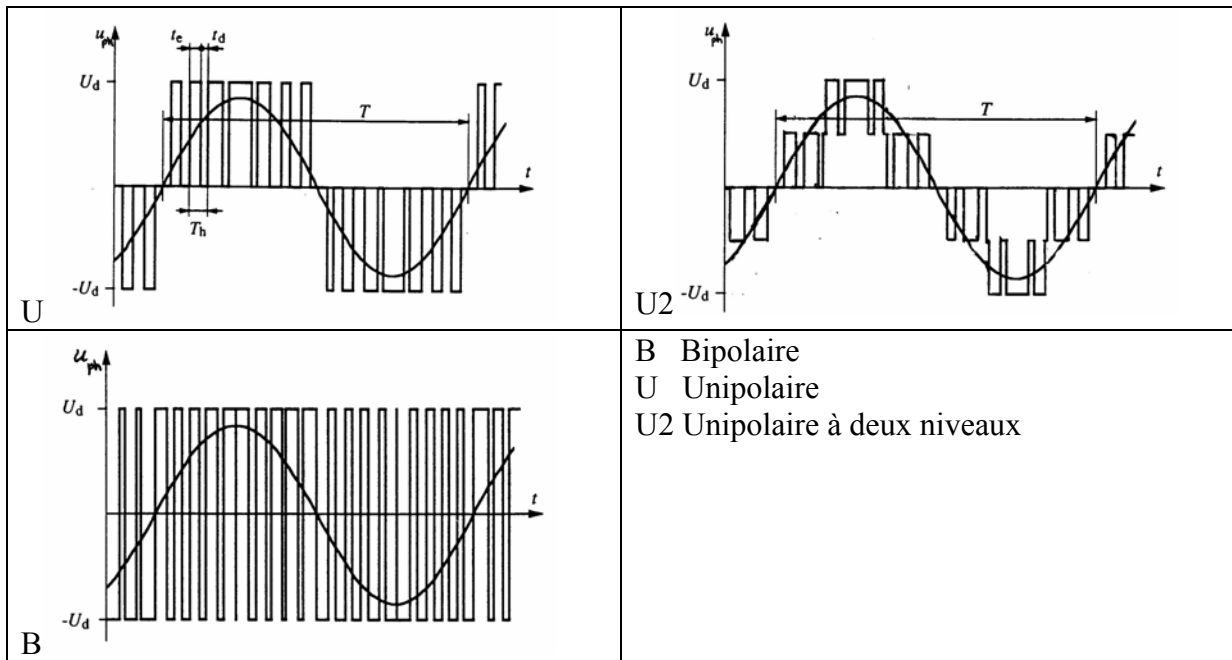


Fig. 4.167 Architectures de branches d'onduleur.

La commande des branches des convertisseurs à pulsation a, elle aussi, évolué en fonction de la rapidité des semi-conducteurs pour se stabiliser à la commande unipolaire.



B Bipolaire  
 U Unipolaire  
 U2 Unipolaire à deux niveaux

Fig. 4.168 Commandes de branches d'onduleur.

Branche	A	B	C	D	E
Diodes	8	4	6	2	2
Semi-conducteurs	18 Thy	4 GTO	4 GTO	2 GTO	2 IGBT
Selfs	4	4	2	1	1
Condensateurs	2	0	0	0	0
Commande	B	B	U2	U	U
Puissance [MW]	0,3 – 0,5	0,5	0,4 – 1	0,3 – 0,9	0,5 – 0,9
Année de début	1979	1987	1990	1992	(1997) 2004
Exemples	DB : 120 NSB: E117 DSB: EA3000	BT: Re 456 CFF: Re 450	CFF: Re 460 ÖBB : 1822 FS: ETR500	BLS: Re 465 SNCF : BB 36000 DB : 185	(ABB: 12X) DB : 185.2 SNCF : BB 447000

Fig. 4.168 & 4.167 Exemples de branches d'onduleur.

Les premières réalisations ont fait appel à des ponts à commutation par séquence de phase, ce qui permettait d'utiliser les thyristors classiques sans dispositif d'extinction forcée.

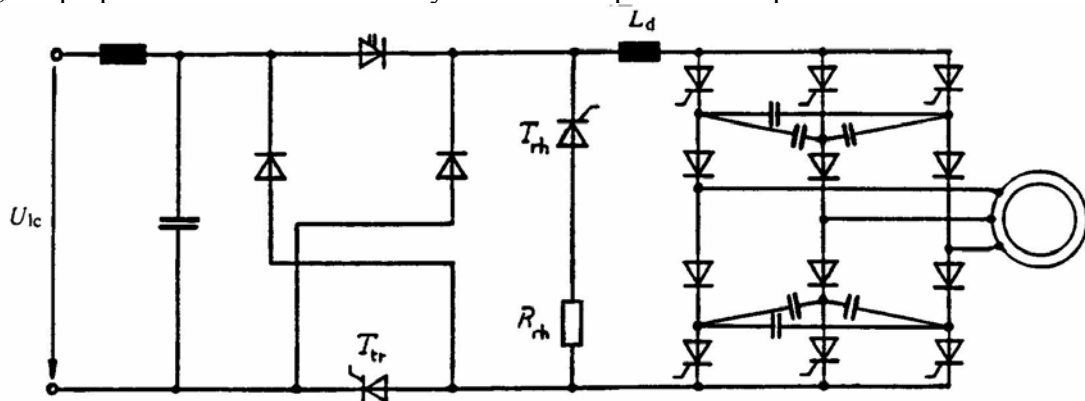


Fig. 4.165 Convertisseur I bidirectionnel pour ligne de contact à courant continu (SNCF : Z20500).

La forme la plus courante actuellement (2005) est le convertisseur U. En courant continu, le convertisseur triphasé est branché à la ligne de contact à travers un filtre LC. Les branches du pont monophasé, très simples (Fig. 4.167D), sont identiques à celles du pont triphasé.

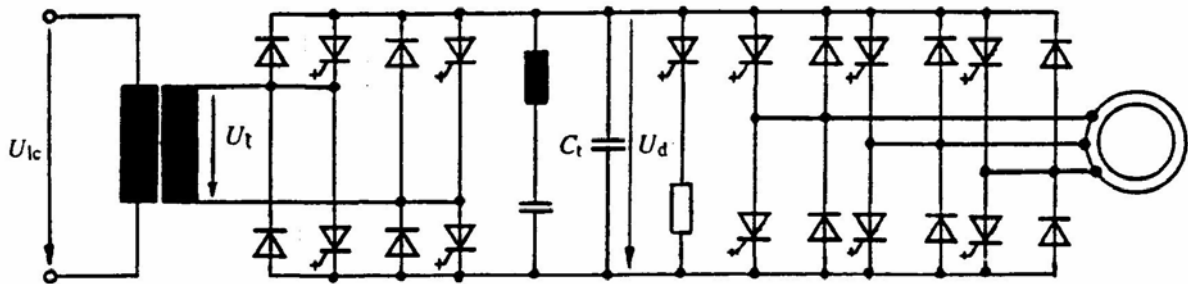


Fig. 4.166A Convertisseur U bidirectionnel pour ligne de contact monophasée (BLS : Re 465).

Dans le développement, on a eu recours au circuit intermédiaire à point milieu, pour garantir une tension de blocage suffisante avec les composants alors disponibles.

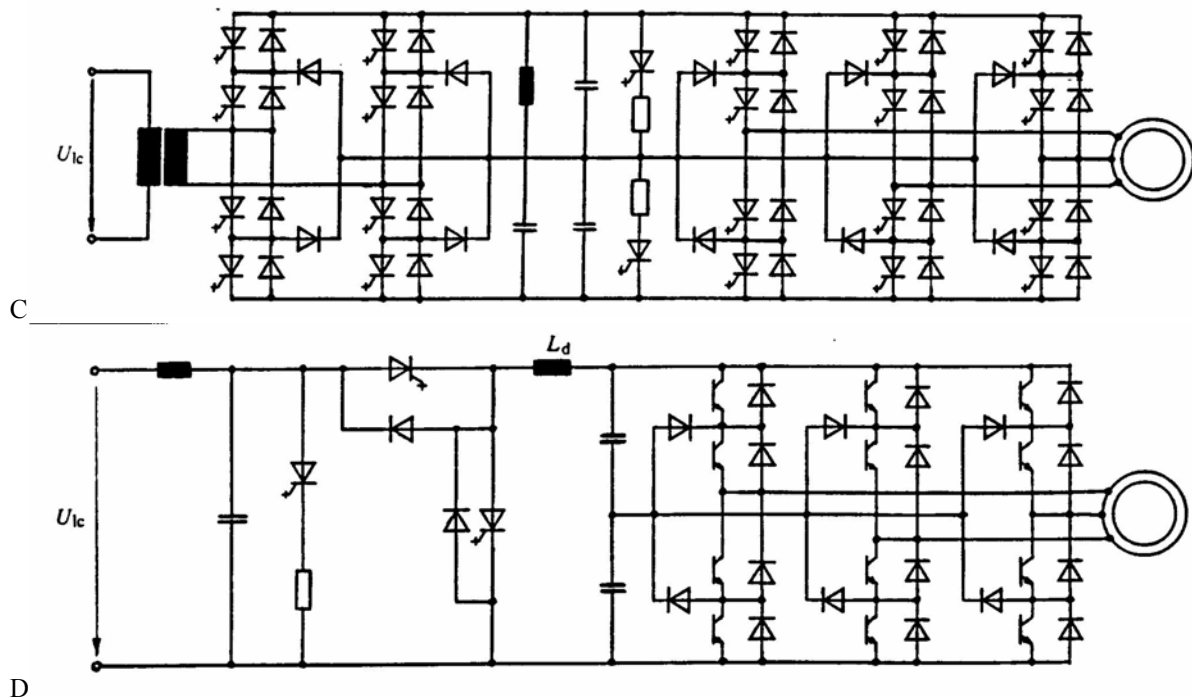


Fig. 4.166 C Convertisseur U bidirectionnel à GTO pour ligne de contact monophasée (CFF : Re 460).

D Convertisseur U bidirectionnel à IGBT pour ligne de contact à courant continu (JNR : 207).

L'évolution des composants permet de prévoir que les réalisations seront désormais à IGBT selon le schéma 4.166A. Cela permet d'égaliser les performances des GTO avec un meilleur rendement et une moindre masse.

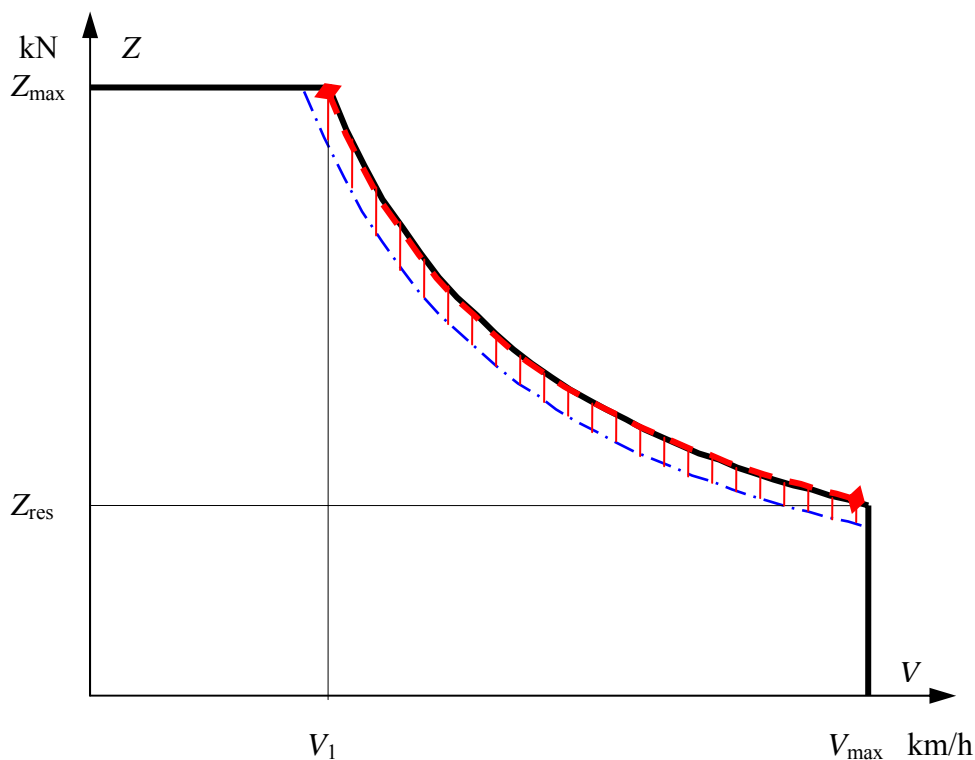
Les convertisseurs monophasés, à l'exception des premières réalisations qui utilisaient les mêmes que pour les moteurs à collecteurs, sont aussi à pulsation (20 fois la fréquence de la ligne) et sont formés de branches interchangeables avec celles des convertisseurs côté moteurs. Dans certaines configurations pour ligne de contact à tension continue à 3 kV, les convertisseurs monophasés sont reconfigurés en hacheurs abaisseurs de tension (CFF: Re 484 : version bicourant de la DB 185.2) alors que d'autres admettent un circuit intermédiaire à 3,8 kV (SNCF: BB 447000).

### Dimensionnements d'entraînement

Les moteurs de traction sont dimensionnés pour une valeur de puissance au régime continu ou nominal (en trait mixte bleu). On peut surcharger les moteurs pendant un certain temps en utilisant l'inertie thermique des organes métalliques de leur construction, sans risquer un échauffement excessif des parties les plus sensibles (hachures rouges sur le diagramme). Evidemment, plus le point de fonctionnement est éloigné de la limite du régime continu, plus le temps de fonctionnement doit être court avant d'atteindre l'échauffement maximal des composants.

Le point de fonctionnement est ajusté par la tension du système triphasé et sa fréquence. La fréquence permet d'ajuster la vitesse alors que le couple est lié aux variations de tension du système triphasé ou du glissement.

Pour les dispositifs à semiconducteurs, donc les onduleurs triphasés, il n'y a pas d'inertie thermique. Le convertisseur doit donc être dimensionné pour la puissance maximale de la caractéristique (♦ - - ♦).



**Fig. 4.164C** Caractéristiques pour un moteur série alimenté par redresseur commandé.



## 4.6 Moteur synchrone

Au début du 21<sup>e</sup> siècle, le moteur synchrone à aimant permanent semble promis à un bel avenir. Grâce aux aimants permanents qui produisent une densité magnétique élevée, on peut construire des moteurs synchrones plus compacts et plus légers que des moteurs asynchrones de même puissance. Ils ont pu trouver leur essor en traction électrique par le développement des aimants en terres rares frittées consolidées par des fibres. Leur prix de revient est cependant plus élevé que celui des moteurs asynchrones. Actuellement, les convertisseurs triphasés qui les alimentent ne présentent pas de différences notables avec ceux alimentant les moteurs asynchrones (Transpôle : VAL 208, BCT : H40LF). Cette chaîne de traction a certes fait ses premières preuves en transports publics, mais elle est aussi retenue pour les prochaines générations de trains à grande vitesse (Japon et France).

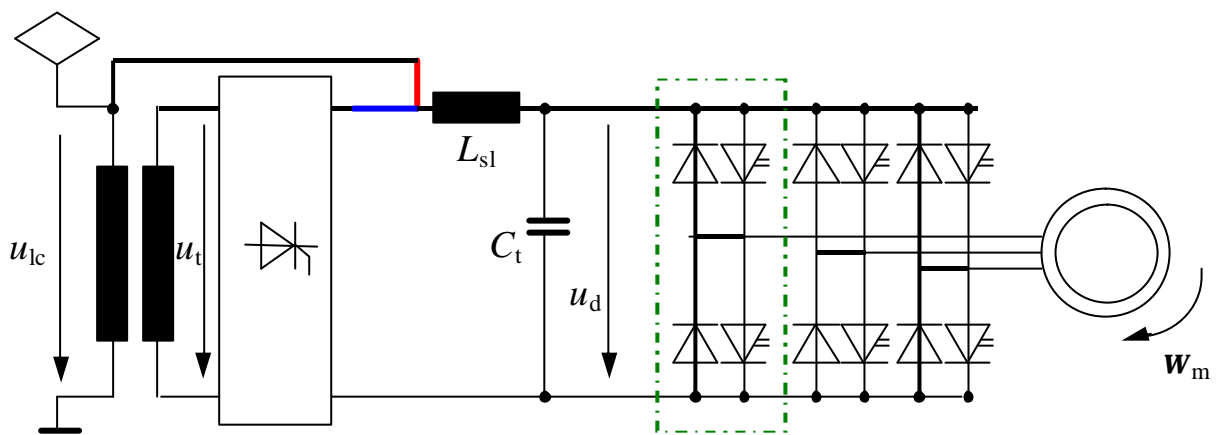


Fig. 4.178A Moteur synchrone à aimant permanent et convertisseur triphasé pour ligne de contact à tension continue ou monophasée. Schéma de principe.

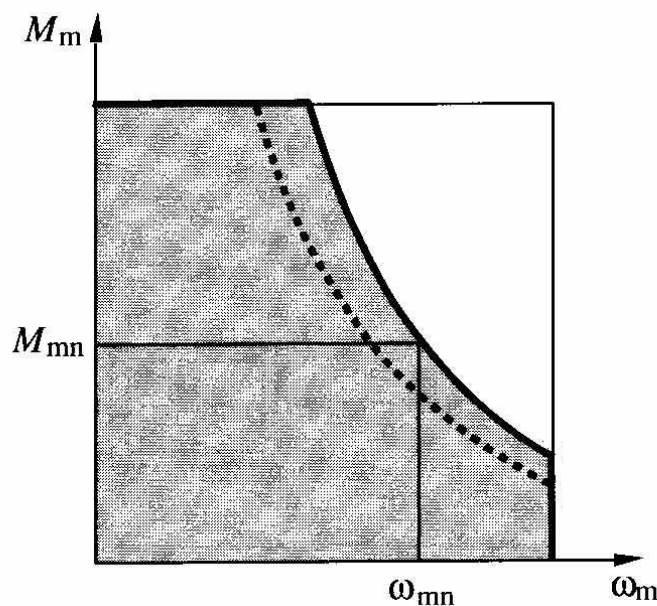


Fig. 4.180A Moteur synchrone et convertisseur triphasé: caractéristiques en fonction de la vitesse.

Auparavant, on avait utilisé des moteurs synchrones à rotor bobiné, nécessitant des bagues collectrices pour l'alimenter à travers un hacheur ou un redresseur. Dans ces premières réalisations, on a utilisé des convertisseurs triphasés à commutation naturelle pilotés par la position rotorique, d'où leur nom de moteurs synchrones autopilotés. Depuis la ligne de contact, on alimentait l'ensemble convertisseur-moteur synchrone à travers un hacheur ou un redresseur comme un moteur à collecteur (SNCF : BB 26000 ou TGV-A). On a pour cette raison aussi utilisé les désignations de *moteur à courant continu à collecteur statique* ou *brushless motor*.

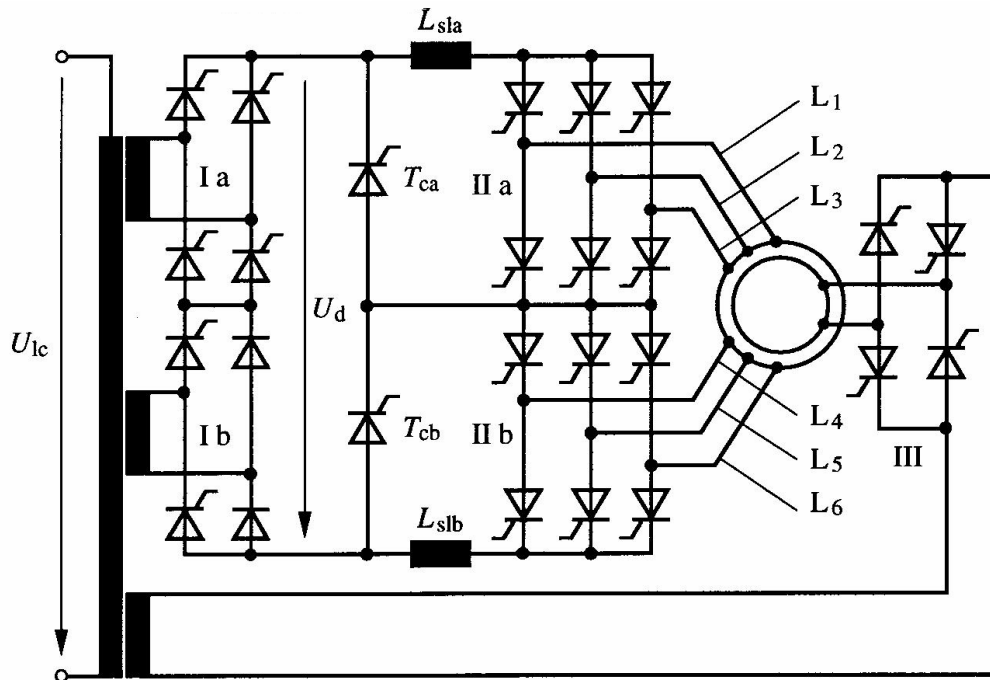


Fig. 4.179 Moteur synchrone autopiloté: schéma de principe : traction et frein à récupération (SNCF: BB 10004).

La zone B est obtenue par réglage de l'angle d'allumage du pont I, la zone C est obtenue par affaiblissement du champ sur le pont III. A très basse vitesse, en zone A, l'extinction des branches du convertisseur II est assurée par les thyristors  $T_c$ , là où la tension induite dans le moteur est trop faible.

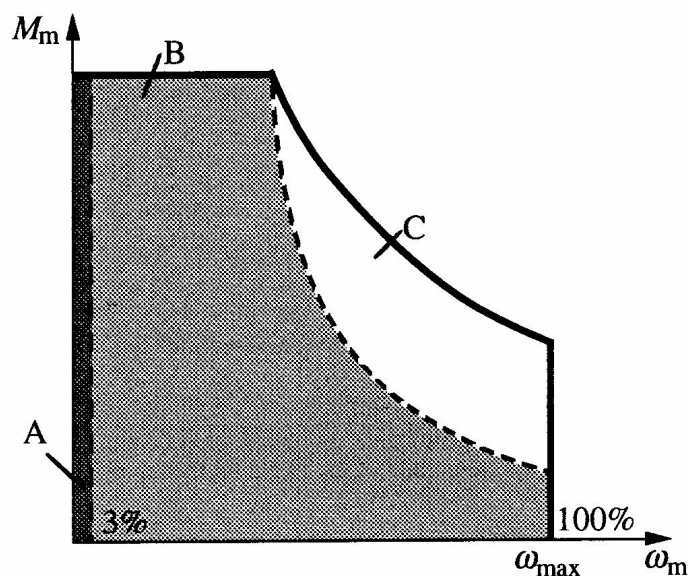


Fig. 4.180 Moteur synchrone autopiloté: caractéristiques en fonction de la vitesse.



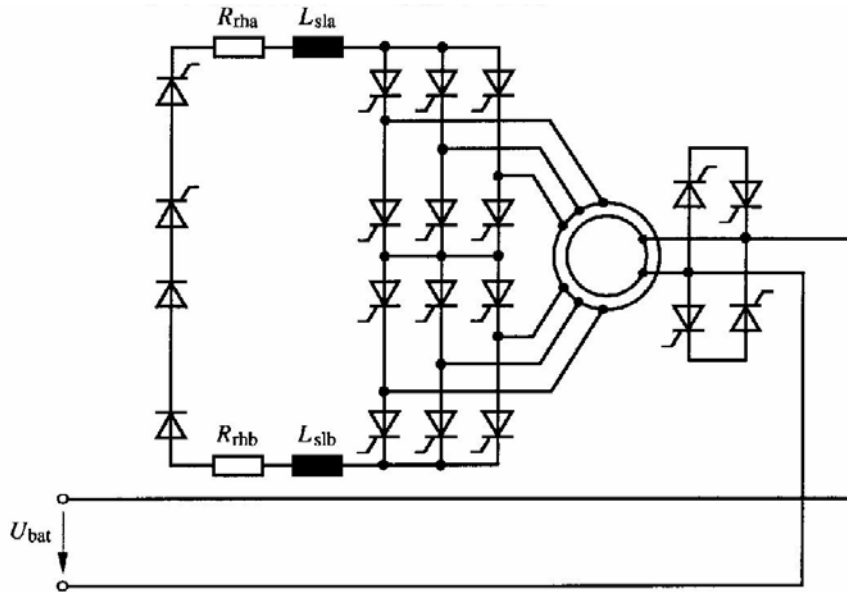


Fig. 4.182 Moteur synchrone autopiloté : frein rhéostatique (SNCF : BB 10004).

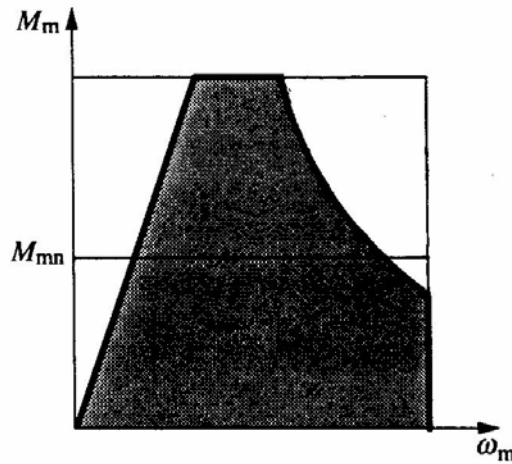


Fig. 4.183 Moteur synchrone autopiloté: caractéristique de freinage en fonction de la vitesse.

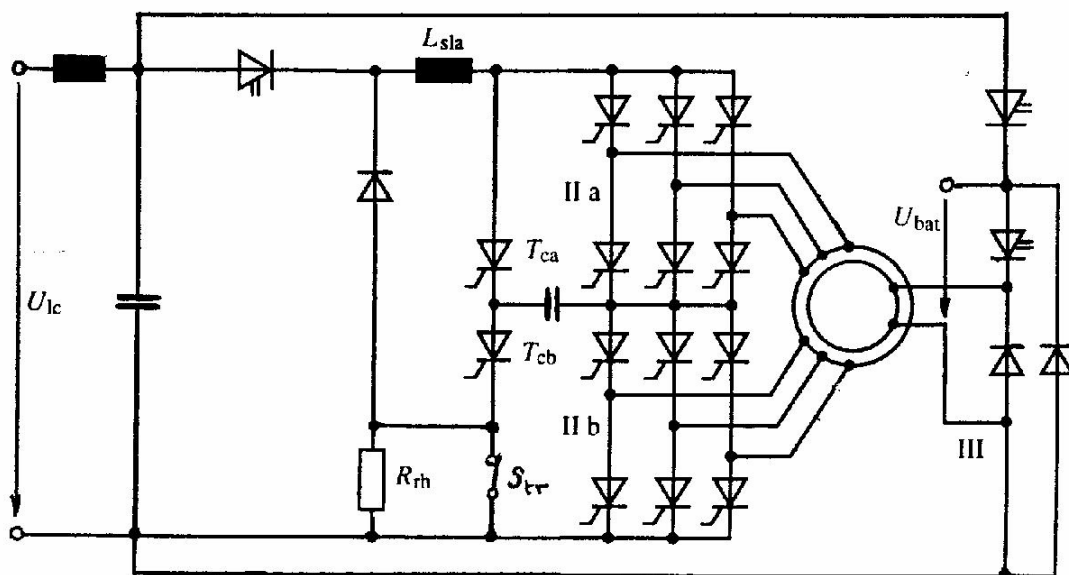


Fig. 4.179A Moteur synchrone autopiloté, continu : traction et frein rhéostatique (SNCF: BB 26000).

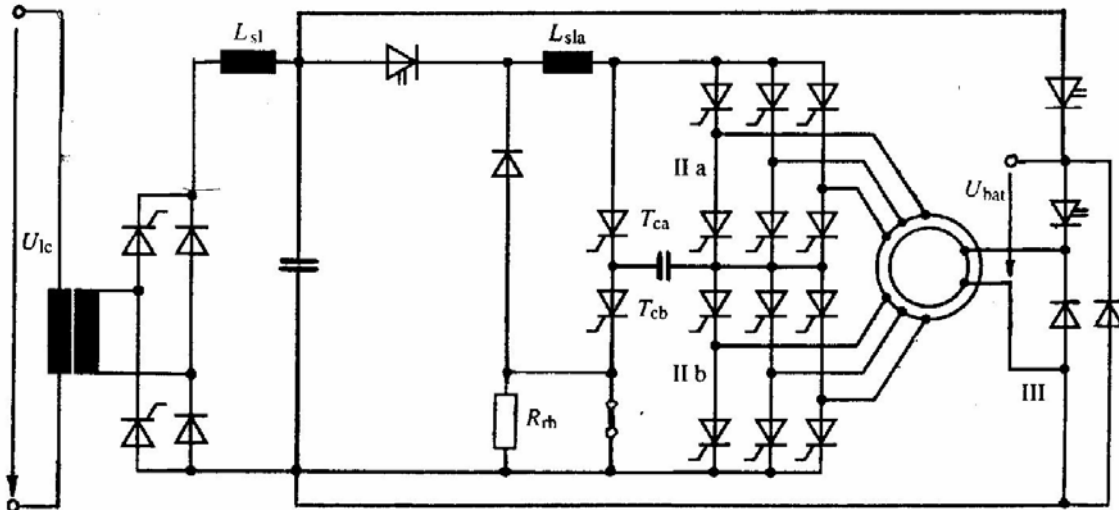


Fig. 4.179B Moteur synchrone autopiloté, monophasé : traction et frein rhéostatique (SNCF: BB 26000).

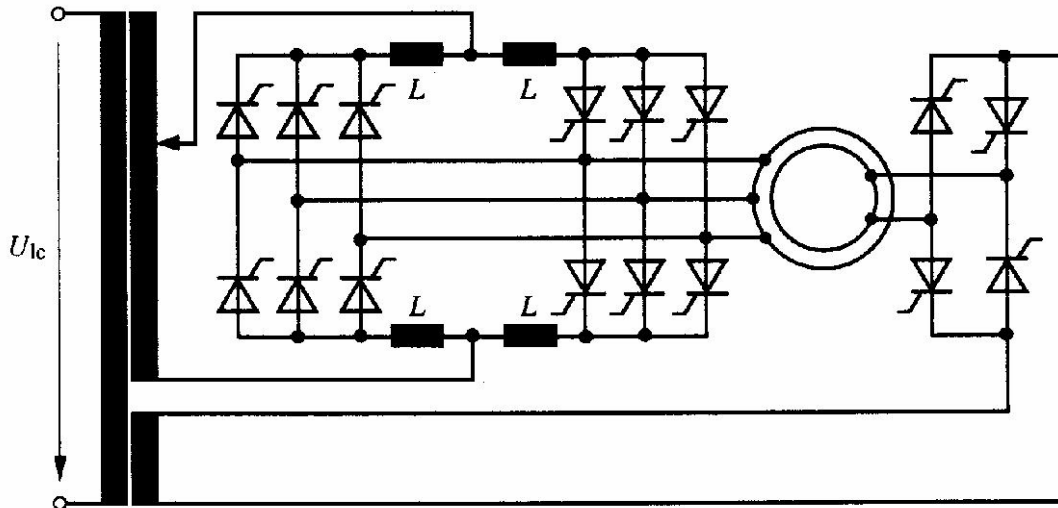


Fig. 4.186 Moteur synchrone à convertisseur direct (SZD : VL80V).

## 4.9 Entraînement thermoélectrique

### 4.9.1 Principe

Au lieu de recevoir l'énergie électrique depuis une ligne de contact, les moteurs électriques d'un engin thermoélectrique reçoivent leur énergie d'un groupe électrogène placé à bord, qui transforme l'énergie chimique d'un carburant en énergie électrique.

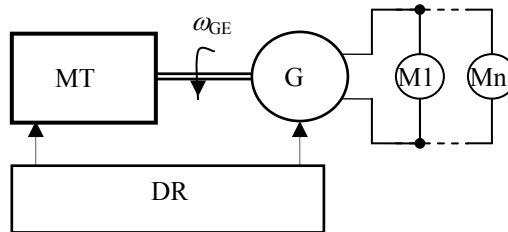


Fig. 4.203A Entraînement thermoélectrique: principe.

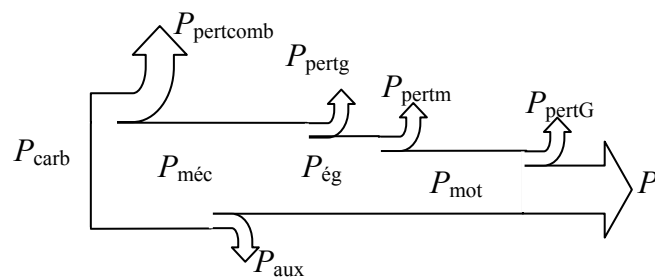


Fig. 4.203B Entraînement thermoélectrique: flux de puissance (les largeurs de flèche ne sont pas à l'échelle).

L'entraînement se compose de quatre niveaux :

- Une machine thermique MT reçoit une puissance sous forme d'un débit  $q$  de carburant et la transforme en puissance mécanique avec un rendement  $\eta_{MT}$ .
- Une génératrice G transforme la puissance mécanique en puissance électrique avec un rendement  $\eta_g$ . La puissance mécanique de la machine thermique doit encore alimenter les auxiliaires notamment le dispositif de réglage DR et l'excitation de la génératrice.
- Les moteurs de traction transforment la puissance électrique en puissance mécanique rotative avec un rendement  $\eta_{mot}$ .
- La transmission et les roues transforment cette puissance en puissance de translation à la jante avec un rendement  $\eta_G$ .

Chaque transformation est caractérisée par un rendement de telle sorte que la puissance disponible à la jante ne dépasse guère le 30 % de la puissance du carburant injecté.

$$P_{méc} = \omega_{GE} M_{MT} \quad (4.100)$$

$$P_{méc} = \eta_{MT} e_{carb} q \quad (4.101)$$

$$P_{ég} = \eta_g (P_{méc} - P_{aux}) \quad (4.102)$$

$$P_{mot} = \eta_{mot} P_{ég} \quad (4.103)$$

$$P_j = \eta_G P_{mot} \quad (4.104)$$

La machine thermique est le plus souvent un moteur diesel (p. ex GTW 2/6 de Stadler) ou un turbine à gaz (Amtrak : JetTrain, SNCF : TGV001). Le rendement d'un moteur diesel dépend de son point de fonctionnement. Les dispositifs de réglage modernes ajustent le point de fonctionnement du moteur pour optimiser ce rendement à la puissance demandée pour la

traction et les auxiliaires (courbe AC sur la figure 4.205). Pour les engins de traction affectés aux trains voyageurs, le groupe électrogène doit encore fournir la puissance hôtelière (chauffage ou climatisation, éclairage,...).

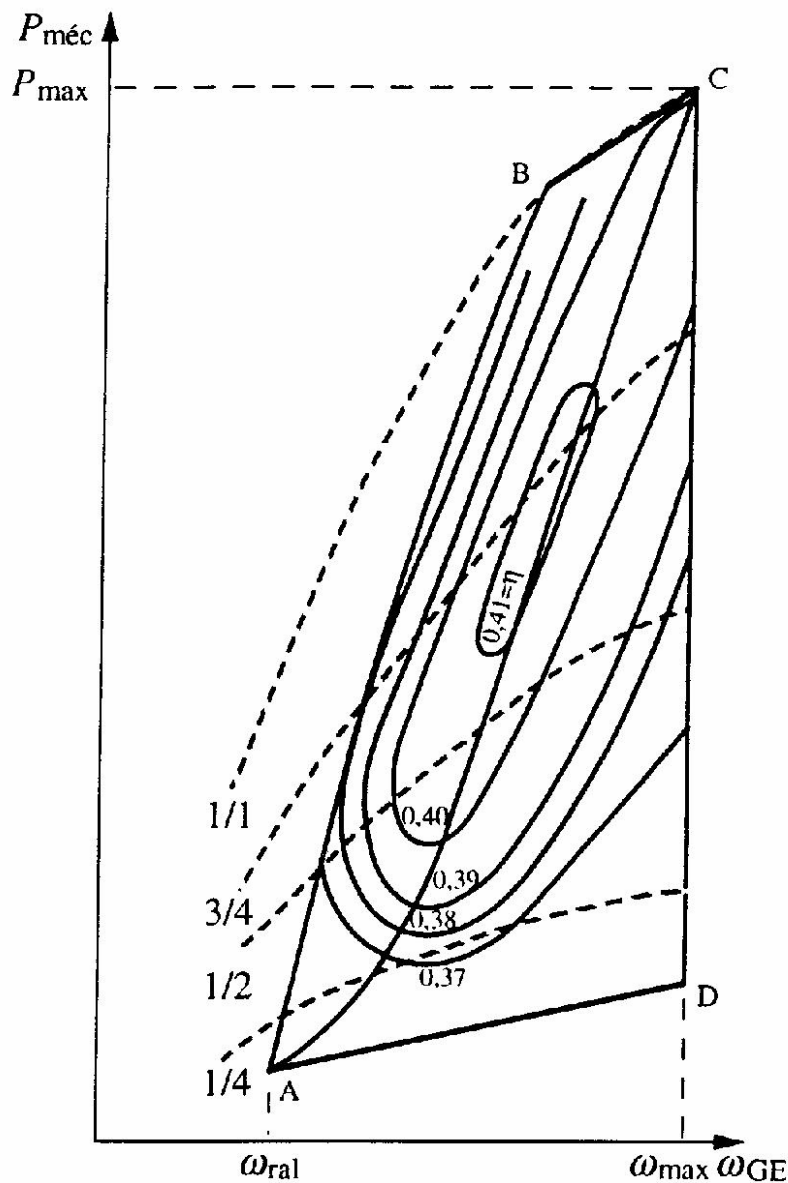
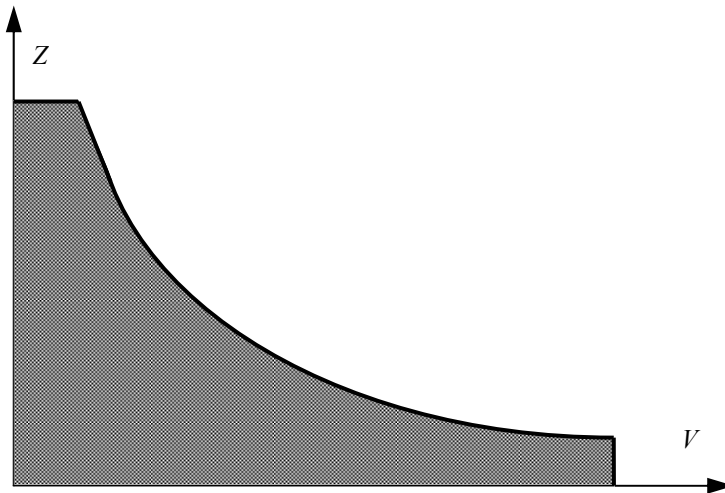


Fig. 4. 205 Rendements d'un moteur diesel sur la caractéristique puissance-vitesse.

La courbe AD est la limite inférieure de fonctionnement pour éviter l'encrassement du moteur, la courbe AB la limite supérieure pour éviter de trop grands rejets de fumée et la courbe BC correspond à la pleine ouverture des injecteurs. Le rendement d'un moteur diesel ne dépasse guère les 40 %, et seulement pour des puissances comprises entre la moitié et les trois quarts de la puissance maximale.

Contrairement aux engins électriques purs, les moteurs de traction ne peuvent guère être sollicités au-delà de leur puissance nominale, car la puissance totale est limitée par celle du groupe électrogène, ce qui donne une caractéristique de traction très étirée (fig.4.215) typique des engins diesel. L'effort maximal commence déjà à diminuer à une vitesse assez faible et l'effort résiduel à vitesse maximale est très faible.

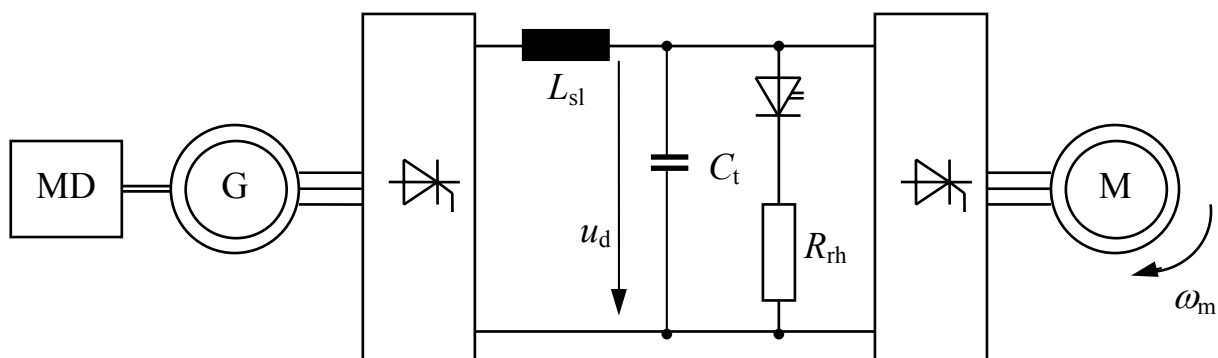


**Fig. 4.215** Entraînement diesel-électrique: caractéristique de traction en fonction de la vitesse.

La génératrice a connu trois stades de développement :

1. Au début, ce fut au début une machine à collecteur à trois enroulements d'excitation – série, shunt et séparée – dont on ajustait le point de fonctionnement par le courant d'excitation fourni par la batterie et amplifié par une machine spécifique entraînée par le moteur thermique (fiche 8.10.1). D'autres variantes de réalisation ont aussi été appliquées.
2. Dès la fin des années '60, on a utilisé une machine synchrone suivie d'un redresseur triphasé à diodes. Le point de fonctionnement est ajusté par le courant rotorique fourni par une machine d'excitation (fiche 8.10.5).
3. Dès 2000 environ, certaines réalisations font appel à une machine asynchrone suivie d'un pont triphasé commandé. Le point de fonctionnement est réglé par la différence entre la fréquence de la génératrice et celle du pont en régime redresseur. Avec cette structure, on peut, en freinage, couper l'alimentation du moteur diesel, la machine asynchrone fonctionnant alors en moteur pour fournir la puissance aux auxiliaires et le pont triphasé fonctionnant en onduleur.

Les moteurs de traction furent au début des moteurs à collecteur à excitation série, comme en traction électrique pure. Ils étaient branchés en parallèle aux bornes de la génératrice (à collecteur ou synchrone redressée). Dès le début des années '80, on adopta des machines asynchrones alimentées par ponts triphasés à fréquence variable (fiche 8.10.3).



**Fig. 4.227** Entraînement diesel-électrique: transmission asynchrone–continu–asynchrone.

Dans les piles à combustibles, la conversion de la puissance du carburant (Hydrogène) à la puissance électrique se fait sans passer par une puissance mécanique. La puissance électrique est produite sous forme de tension continue assez basse, mais avec un courant assez élevé, ce qui amène à choisir un hacheur élévateur de tension avant le circuit intermédiaire.

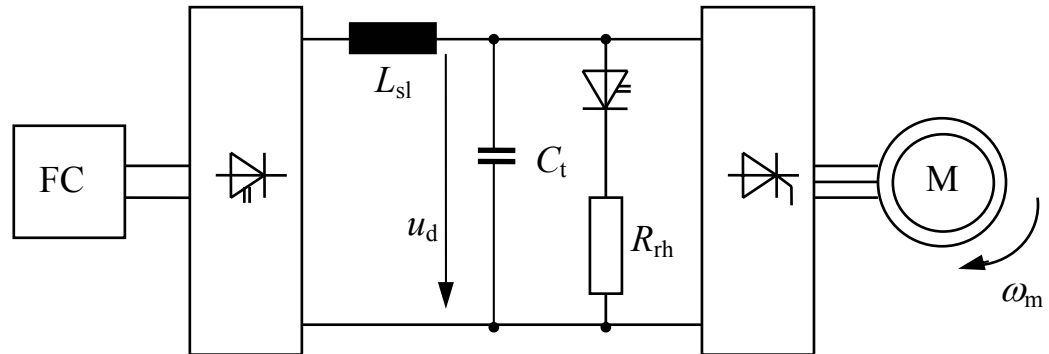


Fig. 4.228 Entraînement à pile à combustible: transmission continu-continu-synchrone.

On peut souligner quelques avantages et inconvénients d'une telle chaîne de traction par rapport à une chaîne diesel-électrique (2003), mais susceptibles d'évoluer ces prochaines années.

- Meilleur rendement (70 % au lieu de 30 %).
- Gaz d'échappement formés de vapeur d'eau.
- Stockage de carburant nettement plus délicat.
- Stations service plus complexes.
- Encombrement plus important.
- Prix d'achat plus élevé.
- Entretien plus important.
- Fiabilité plus faible.

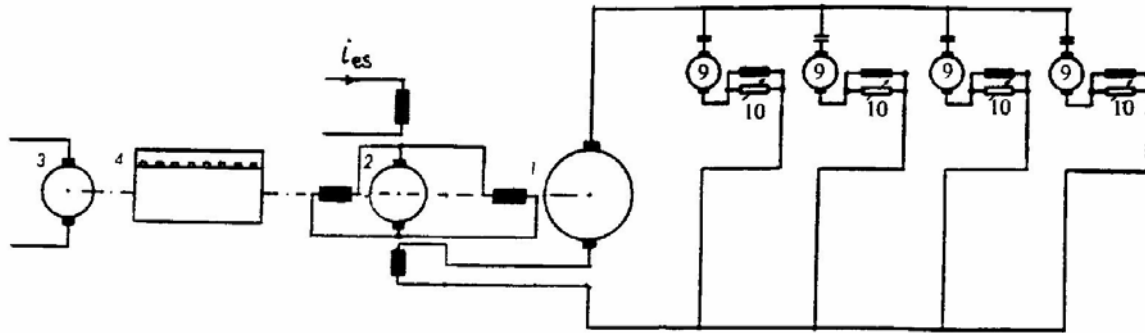


Fig. 4.207 Entraînement thermoélectrique: génératrice à courant continu.

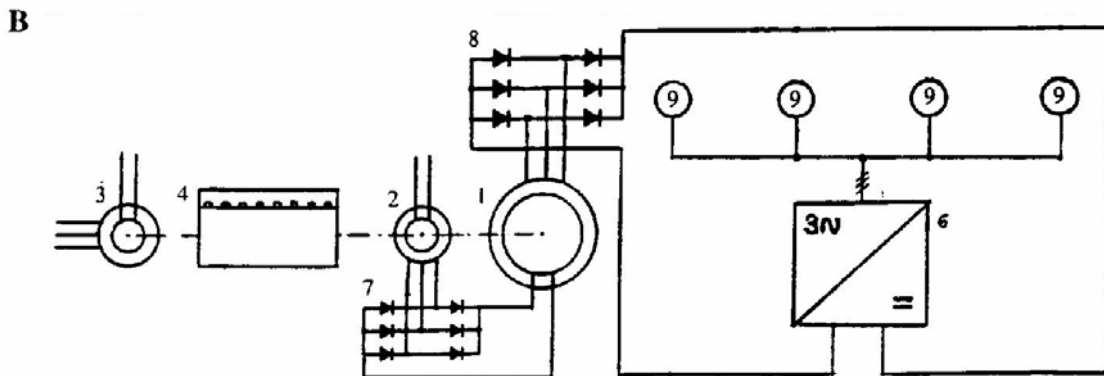
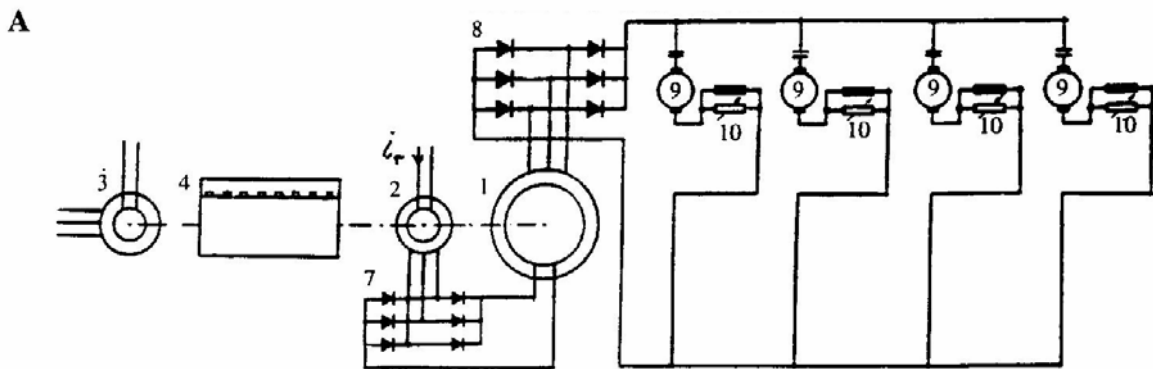


Fig. 4.218 Entraînement thermoélectrique: alternateur synchrone redressé

**A** Moteurs de traction à collecteur.

**B** Moteurs de traction asynchrone et onduleur.

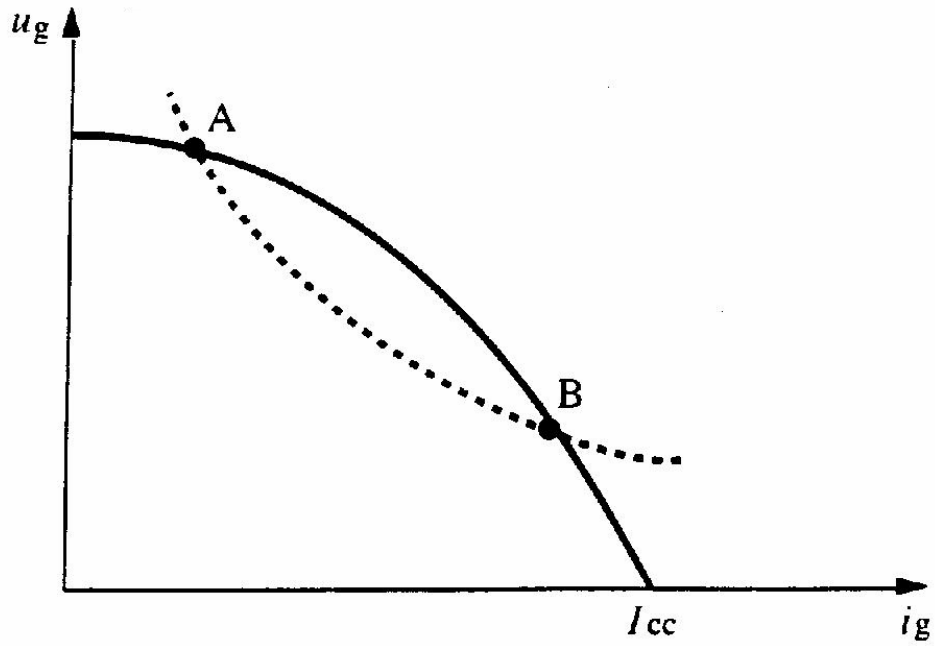


Fig. 4. 221 Caractéristique de sortie limite d'un alternateur.

La courbe AB pointillée indique la limite de puissance du moteur diesel.

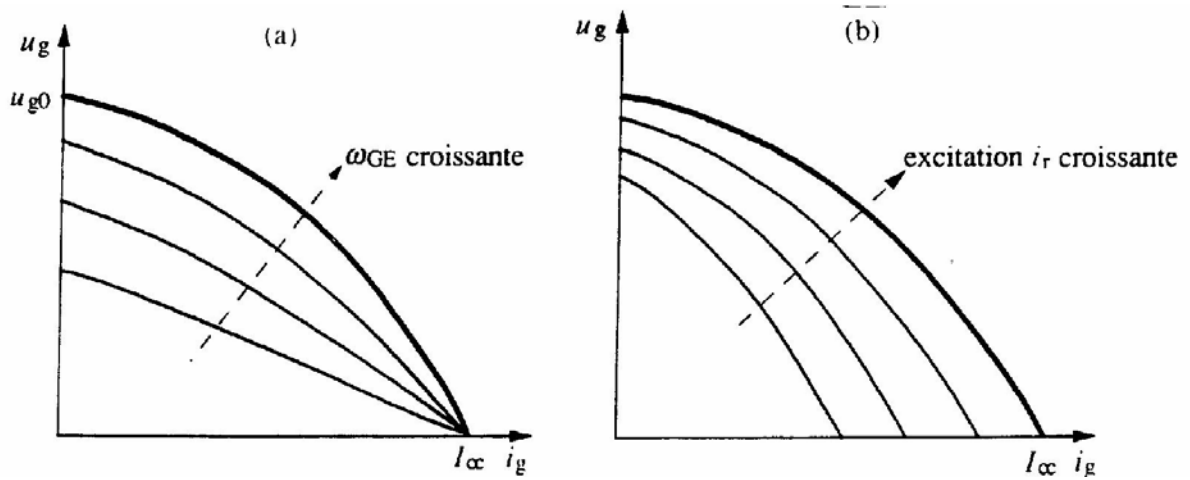
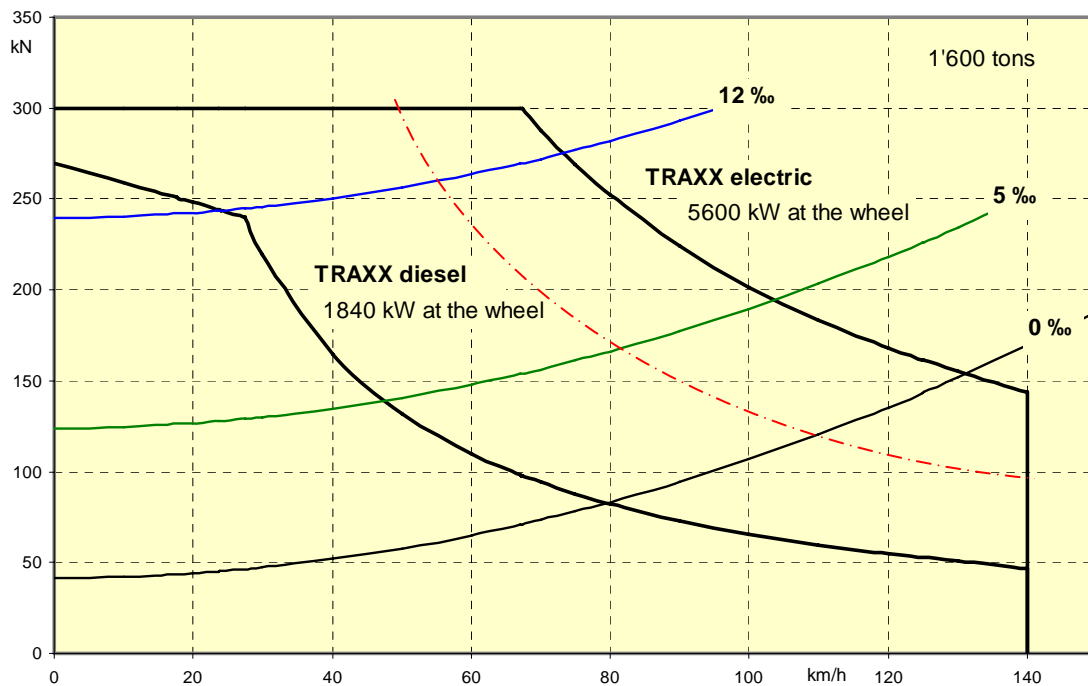


Fig. 4.222 Caractéristiques de sortie d'un alternateur :  
 a pour différentes valeurs de vitesse du groupe à excitation constante.  
 b Pour différentes valeurs d'excitation à vitesse du groupe constante.



## Comparaison électrique – thermique



**Fig. 4. 229** Locomotive électrique et diesel de même masse et même conception (*doc. Bombardier*).

Si on compare un engin de traction diesel-électrique avec un purement électrique, on constate que les performances en régime continu sont meilleures pour la locomotive électrique qui peut développer 4,2 MW (courbe rouge en trait mixte) que pour une diesel-électrique limitée à 1,84 MW par la puissance de son moteur thermique (2,2 MW). De surcroît, on peut demander à la locomotive électrique une puissance supérieure pendant un temps limité (courbe noire : environ 10 minutes). Pour un engin de 82 tonnes, on pourra développer 5600 kW avec une électrique mais seulement 1840 kW avec un diesel-électrique.

On met ainsi en évidence la nécessité plus fréquente en diesel de recours à la traction multiple, mais aussi les performances réduites en accélération pour les trains en traction thermique.

## Alimentation du train

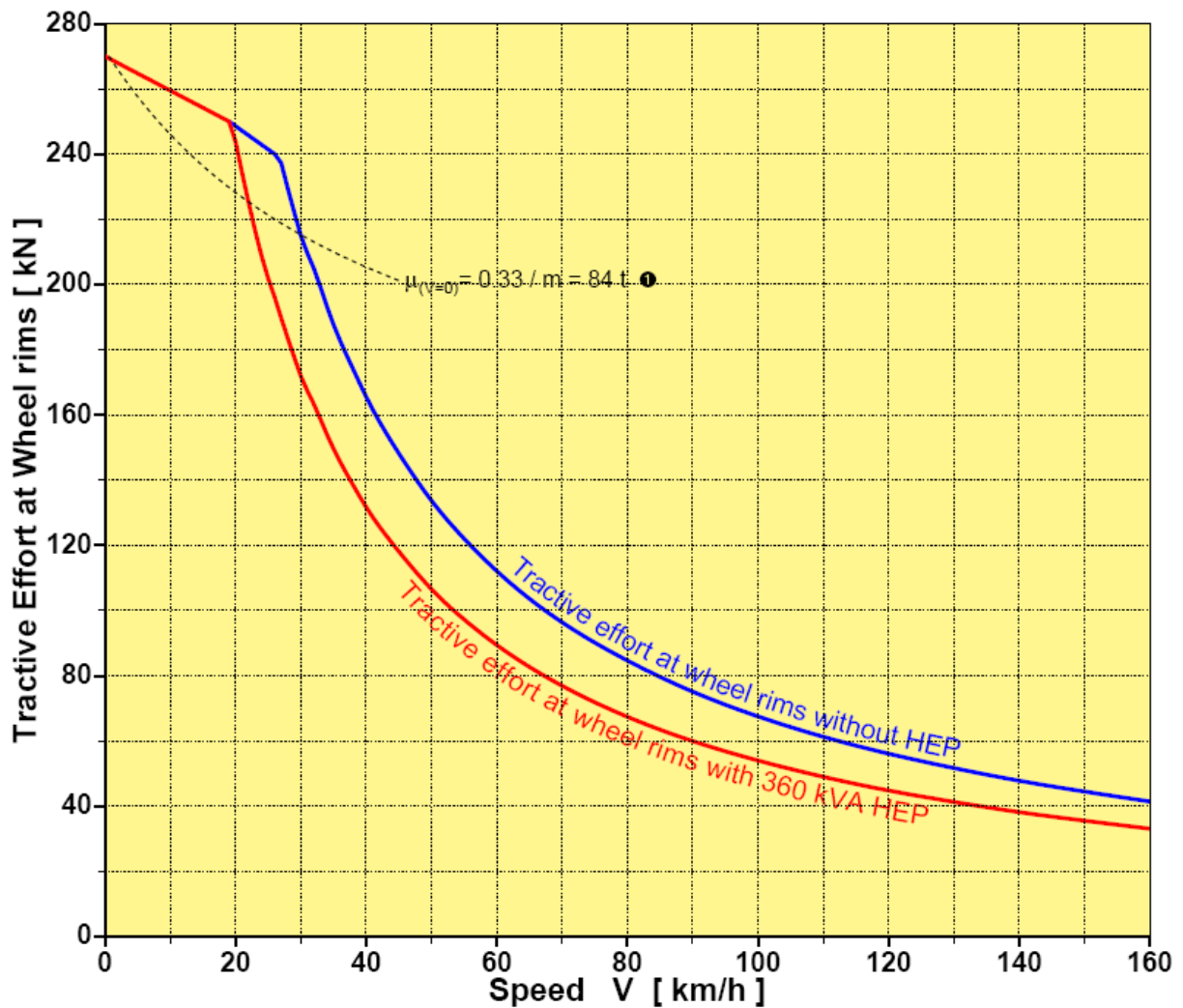


Fig. 4.230 Caractéristique d'effort de locomotive diesel avec et sans alimentation du train (doc. Bombardier).

Si on remorque un train voyageurs avec une locomotive diesel, la puissance nécessaire au train doit aussi être fournie par le moteur diesel. Cette puissance n'est alors plus disponible pour la traction (courbe rouge) ! Ainsi, lors d'un franchissement d'une brève rampe, on peut couper l'alimentation du train – qui sera ainsi privé temporairement de climatisation – pour utiliser toute la puissance du diesel pour la traction.

## 5.1 Transmissions mécaniques

L'entraînement mécanique, ou transmission, a pour but de transmettre aux roues motrices le couple développé par les moteurs de traction.

Entre la caisse d'un engin de traction, le cadre d'un bogie et les boîtes d'essieu prennent place des éléments de suspension. Les moteurs sont le plus souvent fixés au bogie ou à la caisse du véhicule, au moins partiellement. On parle de moteurs entièrement suspendus ou semi-suspendus. Dans ces cas, la transmission doit assurer sa fonction malgré les mouvements relatifs entre l'arbre moteur et les essieux, ou les axes de roues.

La transmission répond encore à deux buts :

- Pour une puissance déterminée, un moteur qui tourne vite est plus compact et plus léger qu'un moteur lent. La transmission comprend donc un réducteur.

$$\omega_e = k_G \omega_m \quad (5.1)$$

- Pour éviter que les à-coups subis par les roues (passages d'appareils de voie ou de joints) se répercutent au moteur, la transmission comprendra encore des éléments élastiques.

La suspension des moteurs et la transmission élastique contribuent aussi à la longévité de la voie : celle-ci ne subit les chocs qu'avec la masse des essieux et non celle supplémentaire des moteurs.

Parmi les transmissions pour moteurs entièrement suspendus, on peut mettre en évidence deux familles très répandues :

- Arbre à cardans placé entre la sortie d'arbre moteur et le réducteur. Il est placé à l'intérieur de l'axe tubulaire du moteur. (*BBC à disques, Sécheron à lames, ASEA, Sumitomo*).
- Arbre à cardans placé entre le réducteur et l'arbre d'essieu. Il est tubulaire et placé autour de l'arbre d'essieu. (*Jaquemin, BBC à joint caoutchouc, Alstom, Kaelble-Gmeinder*).

Les moteurs suspendus par le nez s'appuient d'un côté au châssis par des silent-blocs et de l'autre par des paliers sur l'axe de l'essieu. Ils ne sont donc que semi-suspendus.

Lorsque les moteurs sont fixés sous la caisse, la transmission doit aussi pouvoir assumer les mouvements relatifs de la caisse et du bogie, imposant des arbres télescopiques à cardans (TGV, ICN).

La figure 5.1 présente un inventaire plus complet des diverses solutions.

La puissance mécanique des moteurs n'est pas entièrement transmise à la jante, mais avec un rendement  $\eta_G$  compris entre 0,95 et 0,99.

$$P_j = \eta_G P_{\text{mot}} \quad (5.4)$$

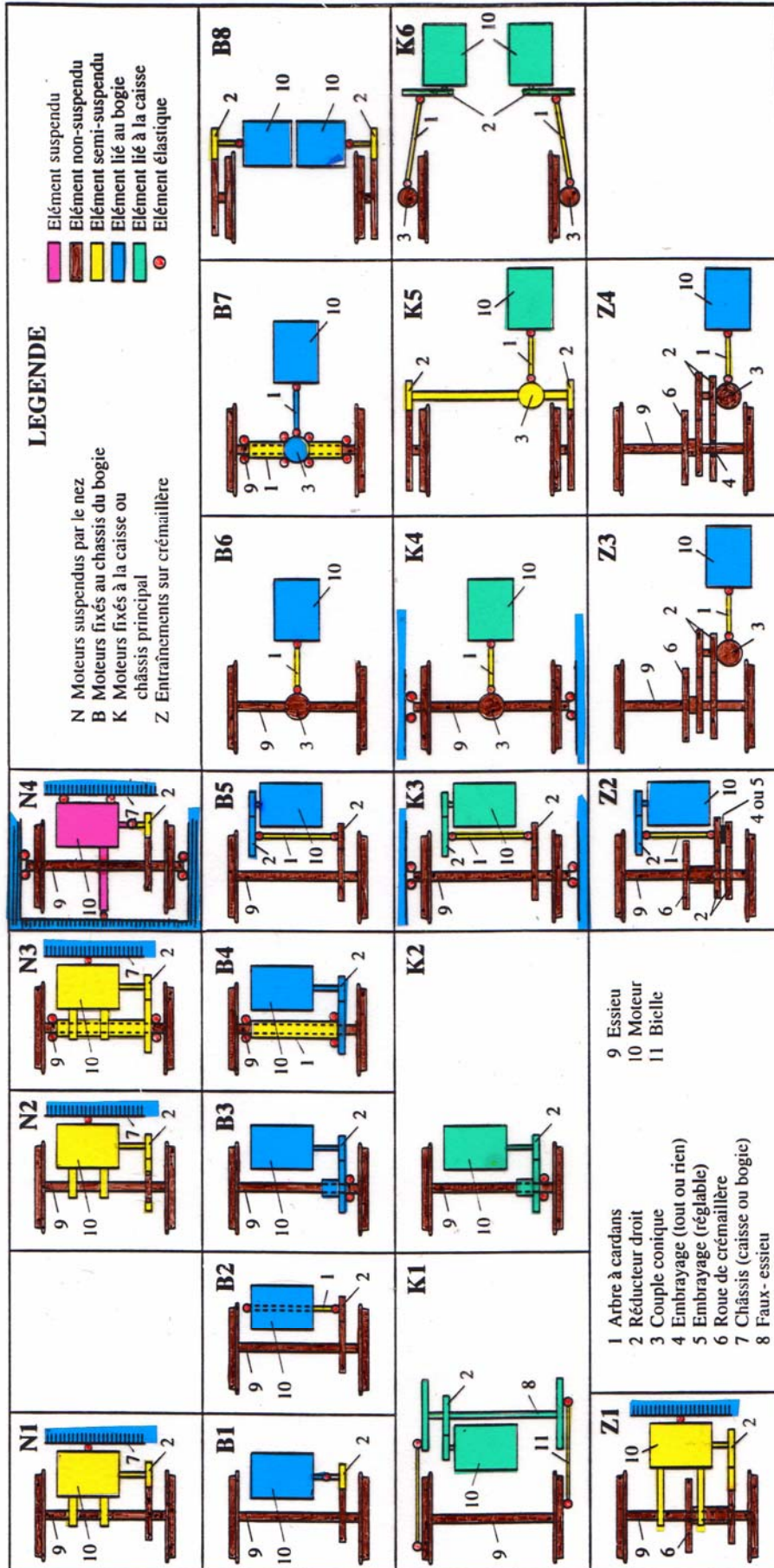
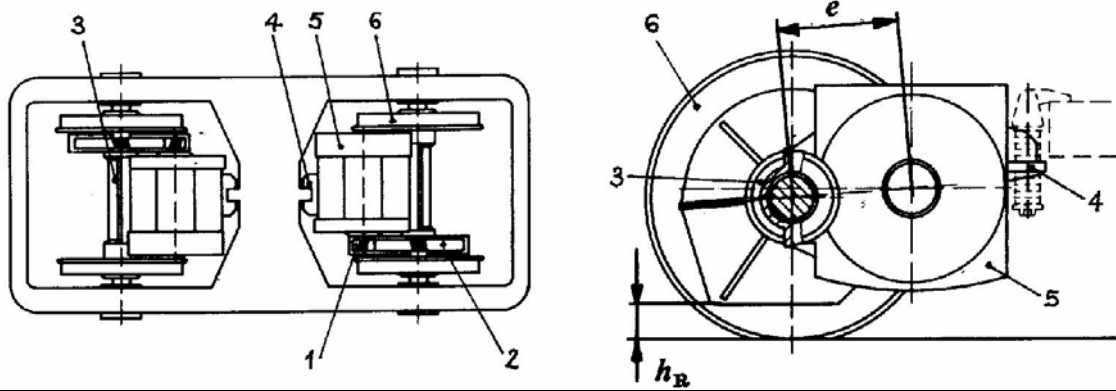
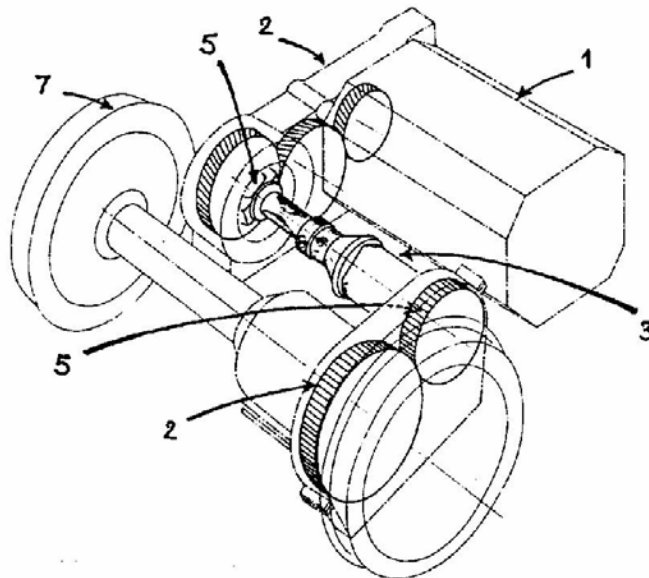


Fig. 5.0 Applications de transmissions.



1 pignon	5 moteur
2 roue dentée	6 essieu
3 palier d'appui	e distance d'engrènement
4 fixation au châssis (nez)	$h_R$ espace sous carter

Fig. 5.2 Moteur suspendu par le nez.



1 moteur de traction (fixé sous caisse)	5 cardan
2 réducteur droit	7 essieu
3 transmission coulissante	

Fig. 5.30A Transmission TGV.

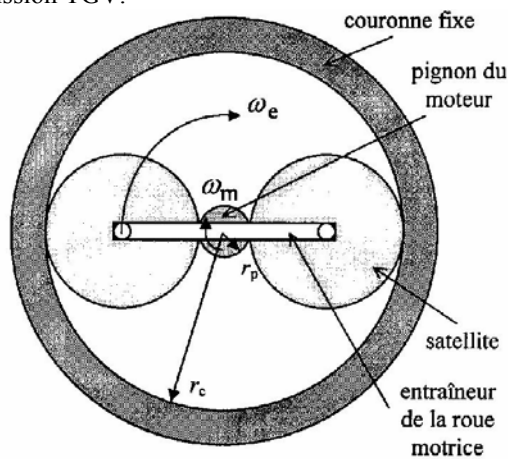
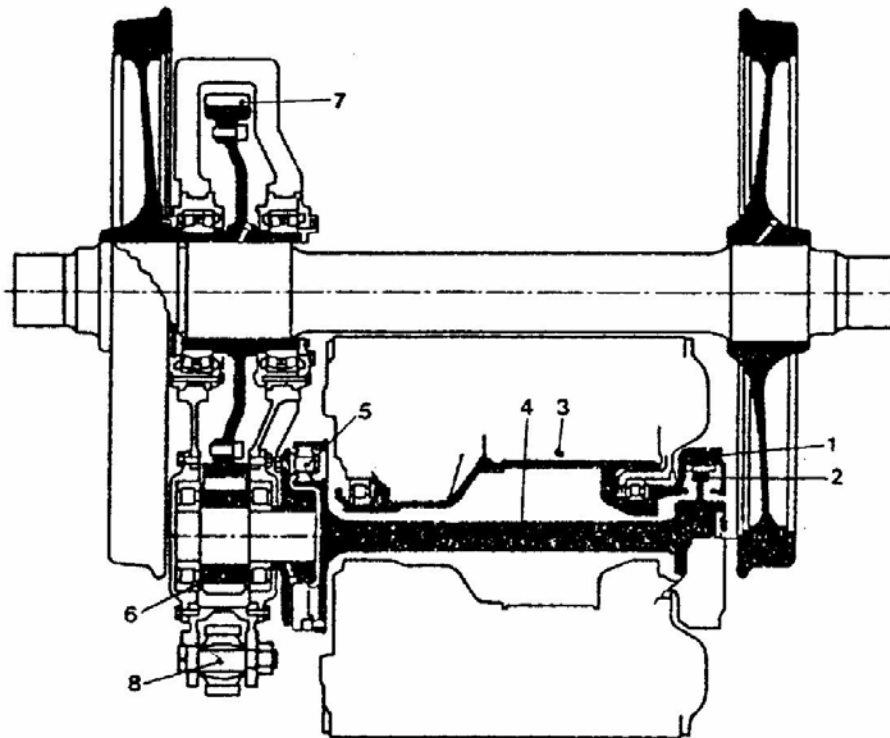
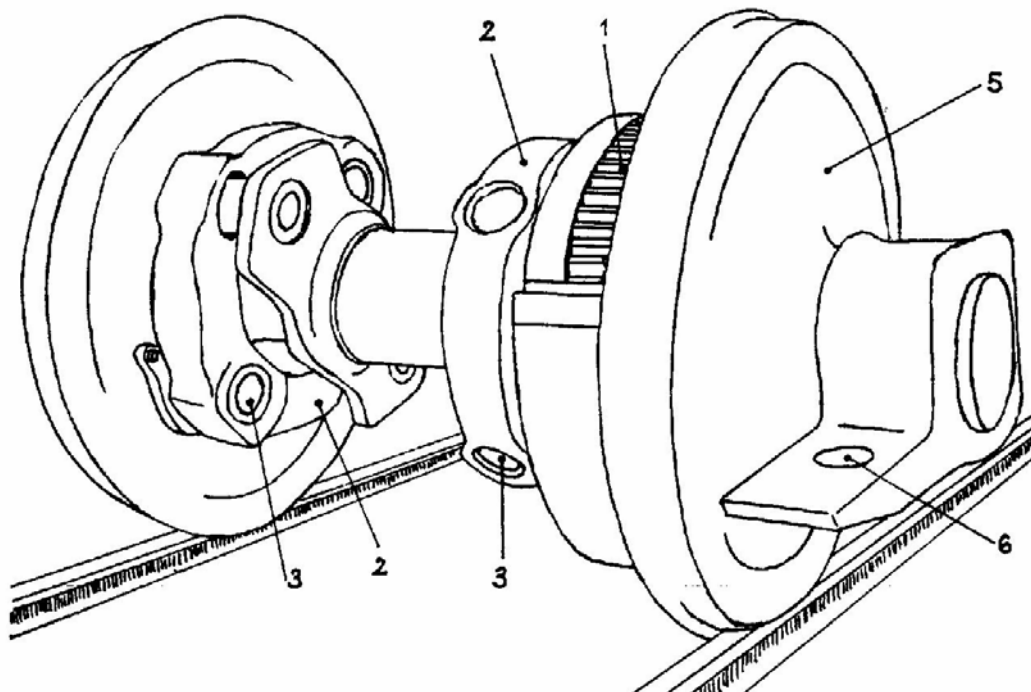


Fig. 5.32A Réducteur épicycloïdal.



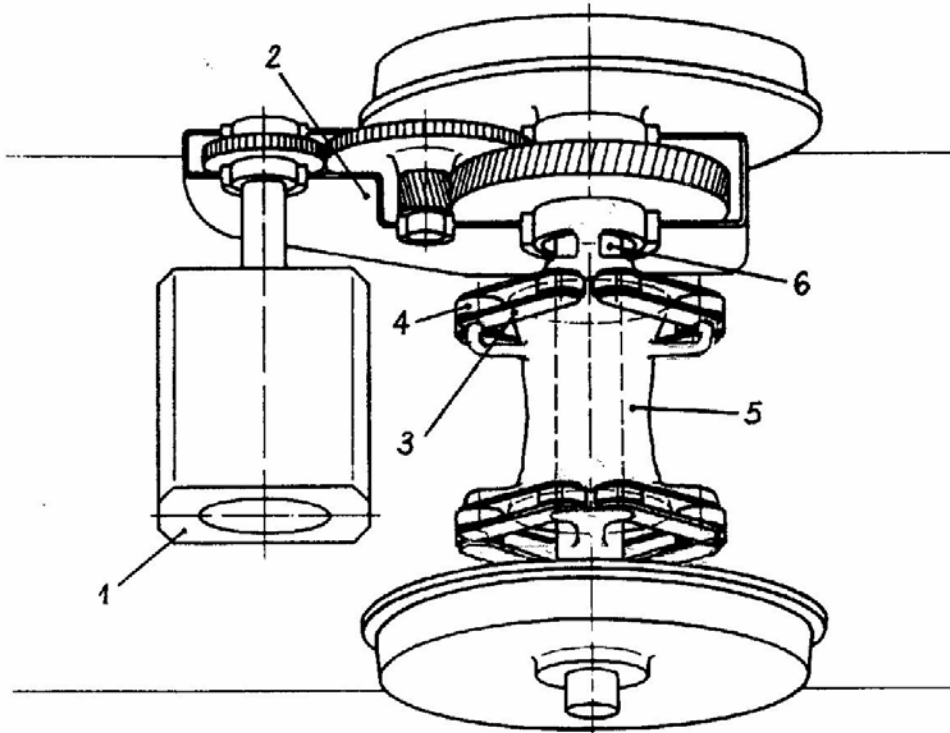
1 accouplement denté dans un bain d'huile	5 cardan à joints caoutchouc
2 pignon denté	6 pignon du réducteur
3 rotor creux	7 grande roue dentée
4 arbre de torsion	8 suspension du carter parle nez

Fig. 5.23 Transmission ASEA.



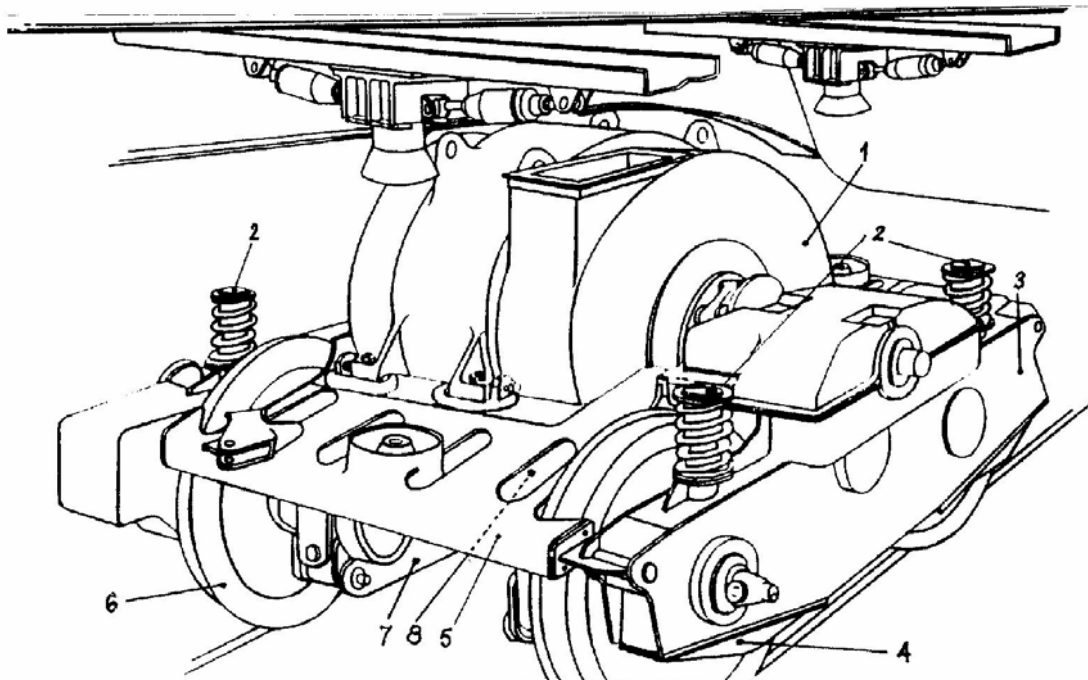
1 grande roue dentée	4 arbre creux
2 anneau	5 essieu
3 rotule	6 appui de suspension primaire

Fig. 5.24 Transmission Jacquemin.



1 moteur	4 joint de caoutchouc
2 réducteur	5 arbre creux
3 biellettes	6 axe d'essieu

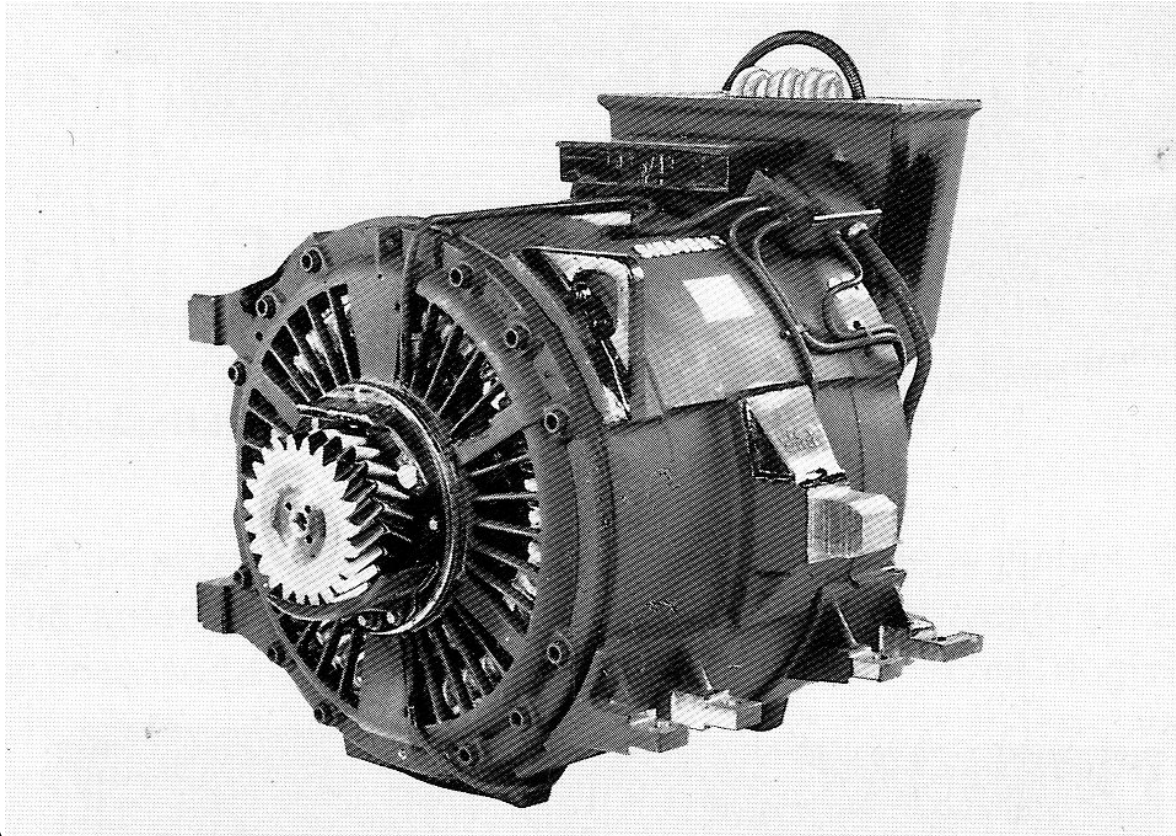
Fig. 5.25 Transmission articulée à joints de caoutchouc (ABB, BBC, Hurth, Kaelble-Gmeinder, Krauss-Maffei).



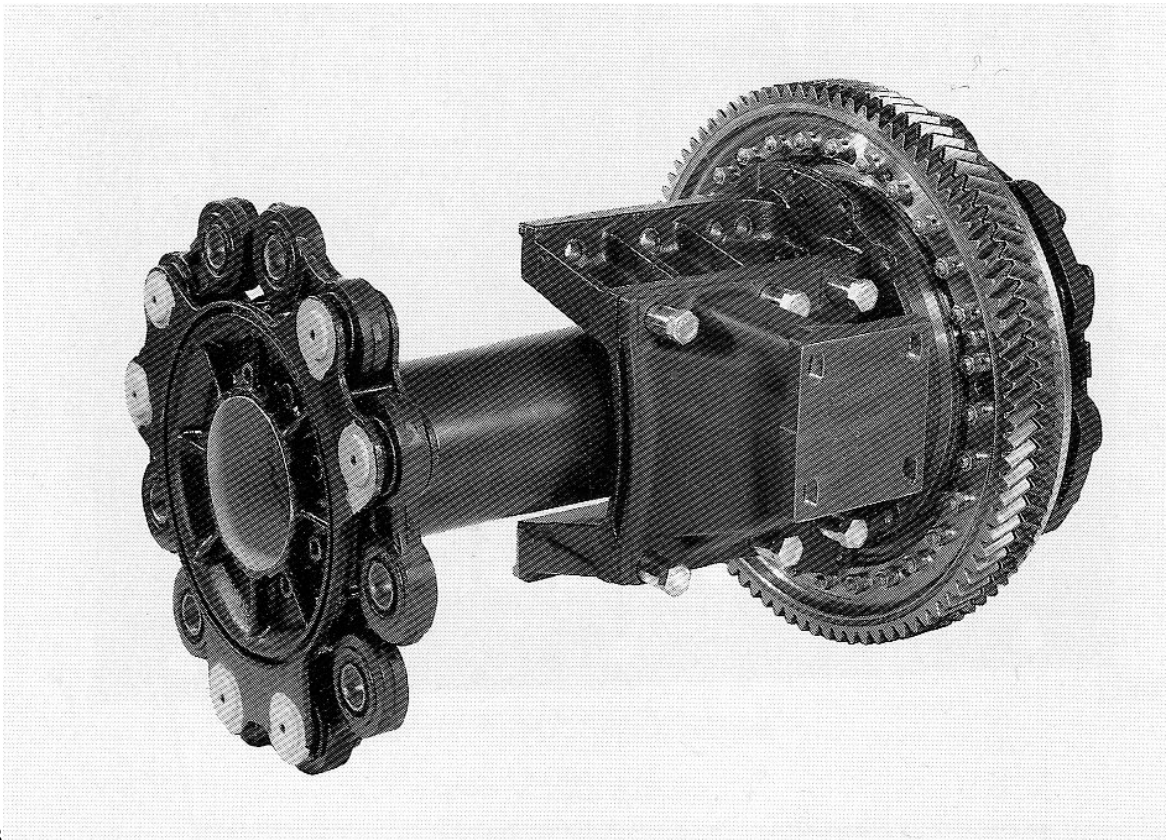
1 moteur	5 châssis du bogie
2 suspension secondaire	6 essieu
3 carter du réducteur	7 boîtes d'essieu lés par longerons
4 anneau dansant	8 suspension primaire

Fig. 5.27 Bogie monomoteur (SNCF : BB 8500).





A



B

A Moteur et pignon. A droite, fixation à la traverse centrale du châssis du bogie

B Grande roue dentée, arbre creux et cardans à biellettes. A droite, fixation à la traverse externe du bogie.

**Fig. 5.35** Exemple de transmission à arbre creux : *Krauss-Maffei*.



## 5.8 Dimensionnement des transmissions mécaniques

L'entraînement mécanique, ou transmission, a pour but de transmettre aux roues motrices le couple développé par les moteurs de traction : les dimensions des dents des réducteurs et les arbres de transmissions doivent évidemment être calculés à cet effet en fonction de l'effort de traction maximal qu'on veut développer, plus une marge. Il ne faut pas oublier les points de fixation et les silentblochs qui doivent tenir le coup, même après vieillissement.

La partie la plus difficile du dimensionnement se situe cependant ailleurs : on est en présence d'un système oscillant à inerties multiples reliées par arbres de torsion. La complexité de tels systèmes croît avec le numéro de la classe (voir page 5-1.1). Pour un système de classe 3, on peut atteindre 20 degrés de liberté de mouvement. Selon les vitesses de circulation, on peut rencontrer des fréquences de résonance de la partie mécanique. Si de surcroît, une fréquence de résonance est encore un multiple ou un sous-multiple entier d'une fréquence électrique due au réseau ou aux harmoniques produites par les convertisseurs, on rencontre vraiment des ennuis majeurs. La science du mécanicien consistera à veiller à ce que ces fréquences de résonance ne soient pas excitées dans les conditions d'exploitation, en dimensionnant en particulier les facteurs d'élasticité des éléments.

Dans le calcul de la taille des dents des réducteurs, on veillera à ce que le nombre de points de contact reste constant lors de l'engrènement, pour ne pas engendrer des vibrations.

A certaines vitesses, un faux-rond – de quelques dixièmes de millimètres – des roues peut engendrer des vibrations qui excitent une résonance dans la structure mécanique de plus grande amplitude.

## 5.9 Transmissions à crémaillère

Pour franchir des fortes rampes, l'adhérence n'est pas suffisante pour assurer la traction et on a recours à des roues dentées qui s'engrènent sur un rail denté.

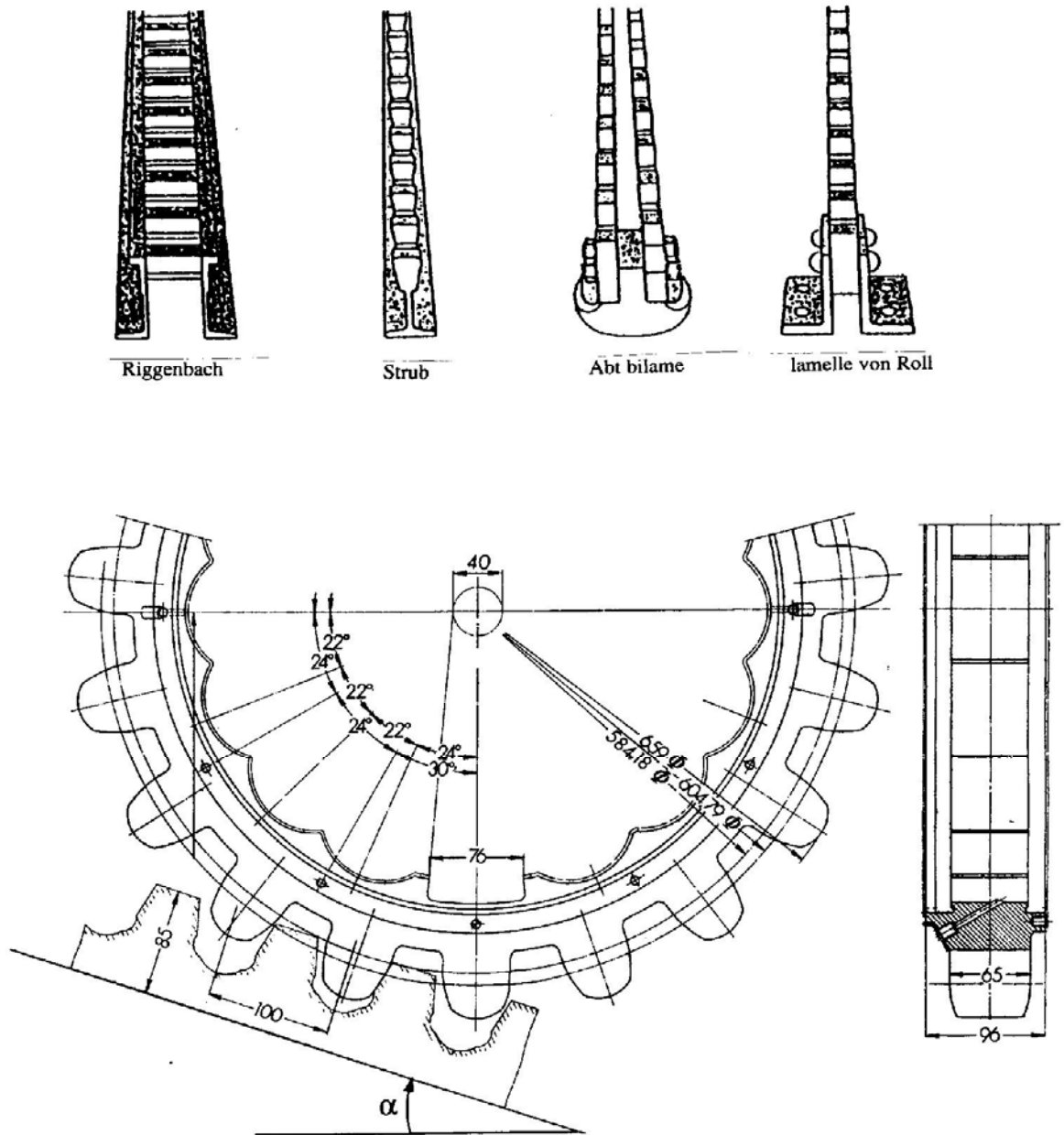


Fig. 5.36 Crémaillère.

## 6.1 Auxiliaires

Si on privilégie souvent l'étude de la chaîne de traction électrique et mécanique, il serait faux de négliger les services auxiliaires, essentiels au fonctionnement de la traction.

En prélevant l'énergie à la ligne de contact (ou au moteur diesel), les auxiliaires doivent fournir deux types de prestation :

1. Fourniture des services nécessaires au bon fonctionnement de l'équipement de traction et à la bonne circulation du train.
2. Fourniture de la puissance pour les équipements de confort des voyageurs (éclairage, chauffage – climatisation, manœuvre des portes, etc.).

On se concentre sur le premier type, nécessaire pour tout convoi.

Un engin de traction est en général garé pantos baissés. Il faut donc disposer d'énergie à bord pour l'enclencher jusqu'à la montée du pantographe contre la ligne de contact et la fermeture du disjoncteur principal. Cette énergie est stockée dans une batterie qui est ensuite rechargée depuis la ligne de contact par un dispositif approprié. Sur un engin autonome, l'énergie accumulée doit garantir le démarrage du moteur diesel.

Le freinage du train doit être garanti en tout temps. En général, on utilise une énergie sous forme pneumatique (vide ou air comprimé). Il faut veiller à ce que le compresseur, ou la pompe à vide, garantisse une disponibilité sans faille de cette énergie pneumatique.

Enfin, il faut encore assurer le refroidissement et la lubrification des organes de la chaîne de traction. Les moteurs des ventilateurs et pompes doivent être fonctionnels quel que soit le niveau de tension à la ligne de contact (standard :  $-30\%$   $+20\%$  par rapport à la valeur nominale).

Dans les réalisations modernes (dès 1990 environ), on a installé un convertisseur statique qui produit – depuis le circuit intermédiaire à tension continue – un réseau triphasé de bord à tension et fréquence fixe (p. ex. 400V 50 Hz). Souvent, on a même deux convertisseurs statiques de manière à garantir une certaine redondance pour couvrir les fonctions essentielles en cas de défaut sur un convertisseur. Cela permet de choisir pour les auxiliaires des composants industriels produits en grande série plutôt que développés spécialement.

Dans les réalisations plus anciennes, on peut observer des solutions complexes et ingénieuses pour garantir la disponibilité et la fiabilité de tous les équipements vitaux.

## 7.1 Automatismes

On ne va pas ici faire un cours d'automatisation, mais décrire quelques domaines dans lesquels la traction électrique a recours à des automatismes.

On peut distinguer plusieurs niveaux:

1. Régulations ou commandes rapides qui ne peuvent être exécutées par l'homme : réglage de courant d'un moteur alimenté par convertisseur statique, commande des commutateurs statiques dans un onduleur triphasé, commande de la séquence de manipulation des contacteurs lors d'une transition série-parallèle, ...
2. Commandes qui soulagent le personnel de conduite en lui permettant de se concentrer sur la circulation du train: cadencement des commandes de contacteurs sur une commande rhéostatique, optimisation du point de fonctionnement d'un groupe diesel-électrique, réglage de frein électrique à récupération, dispositifs antipatinage, ...
3. Fonctions de surveillance où la conduite est reprise en automatique en cas de défaillance du personnel de conduite : freinage du train avant un signal si la décélération n'est pas suffisante (European Train Control System (ETCS) niveau 1). Commande centralisée des trains sans signalisation latérale (ETCS niveau 2).
4. Automatismes de circulation, où le personnel n'a qu'une fonction de surveillance (ETCS niveau 3, RATP : ligne 1) ou est totalement absent (Lille : VAL, RATP : Meteor). Il est nécessaire de très bien connaître la vitesse et position des convois pour garantir une excellente sécurité et une excellente fiabilité des circulations.

L'ingénieur qui met en œuvre de tels automatismes ne doit pas seulement veiller à leurs performances, mais aussi au parfait respect des législations concernées, qui diffèrent parfois d'un pays à l'autre pour la même tâche.

## 8.1 Présentation

Pour illustrer de manière attractive les chapitres théoriques, on propose un certain nombre d'exemples de véhicules construits dans le monde entier. Chaque exemple choisi fait l'objet d'une fiche technique de 4 pages.

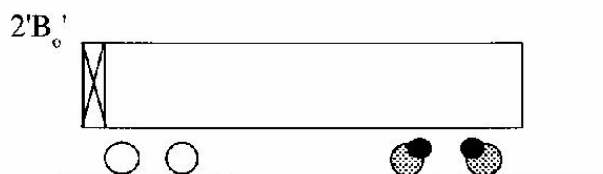
La première page sert de présentation générale :

- Type du véhicule.
- Disposition des essieux.
- Entreprise exploitante.
- Dessin ou photographie.
- Représentation symbolique de l'équipement.
- Année de construction.
- Principales données techniques et performances.

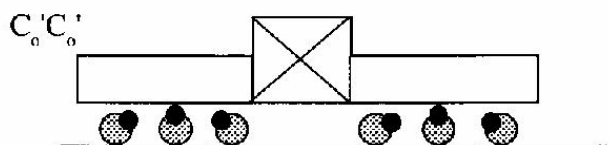
La seconde page donne une description du véhicule, indiquant les cas échéant quels autres séries disposent d'équipements similaires. Des références aux paragraphes concernés dans la partie théorique, et – le cas échéant – à des publications, permettent d'approfondir le sujet.

Les deux dernières pages présentent les caractéristiques d'effort en fonction de la vitesse, les schémas simplifiés de l'équipement de puissance et un diagramme du véhicule.

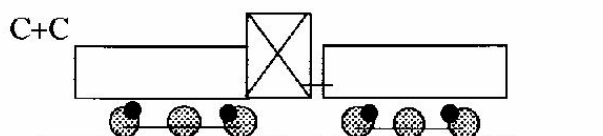
Pour la disposition des essieux, on a repris les conventions de l'UIC, en ajoutant l'indice « i » pour désigner l'entraînement individuel des roues, sans essieu qui les relie, de la même manière que l'indice « o » désigne la commande individuelle des essieux dans un même bogie ou un même châssis.



Véhicule moteur à caisse unique sur deux bogies à deux essieux, un seul bogie est moteur.  
Exemple: Automotrice BT BDe 2/4



Véhicule moteur à châssis unique sur deux bogies à trois essieux moteurs.  
Exemple: Locomotive CFF Ee 6/6 II



Véhicule moteur à deux châssis, chacun sur trois essieux moteurs accouplés.  
Exemple: Locomotive CFF Eem 6/6

**Fig. 8.2** Exemples de désignations de véhicules.

On a classé les fiches selon le type d'alimentation des engins de traction.

Pour la représentation symbolique du véhicule, on a choisi quelques conventions simples qui permettent de se faire une idée d'ensemble du concept du véhicule.

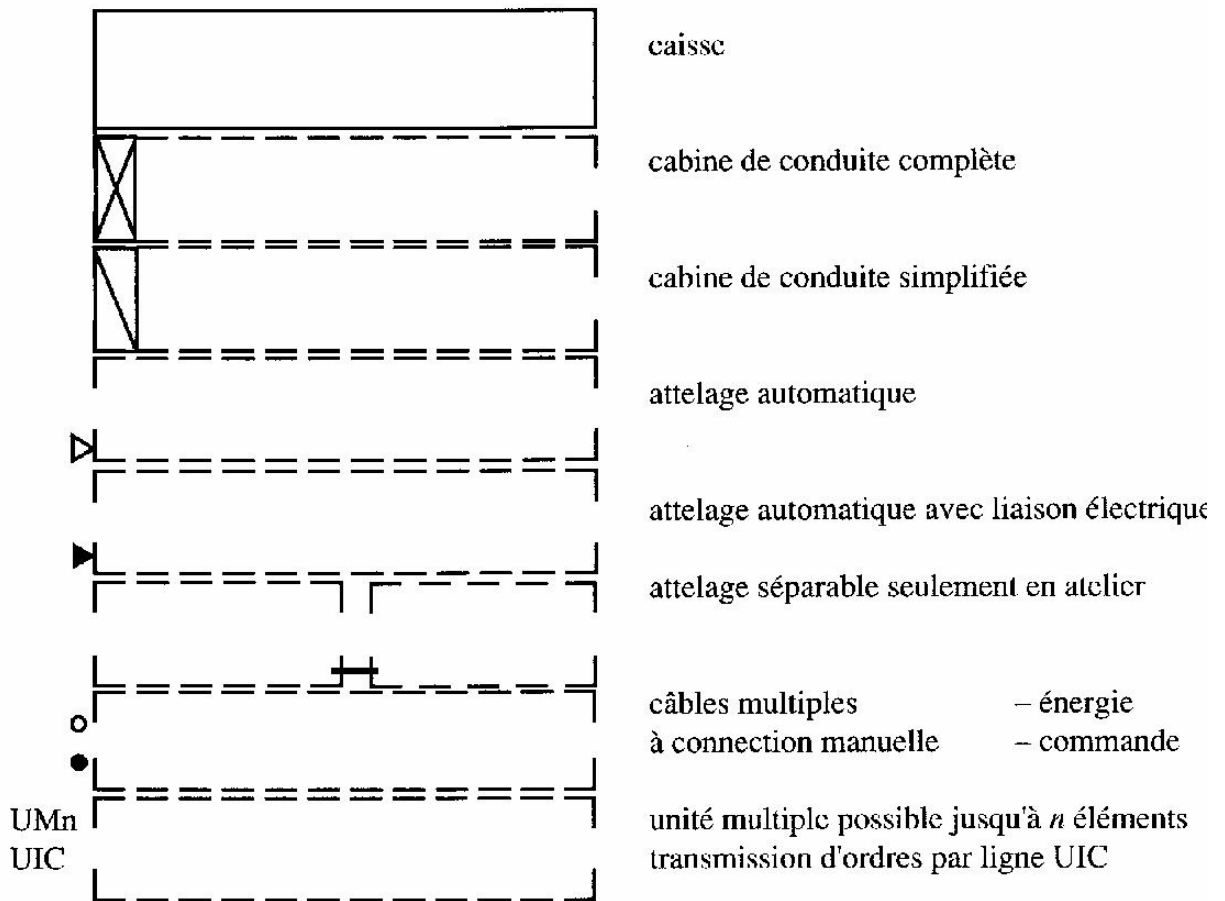


Fig. 8.3 Symboles : caisses et liaisons.

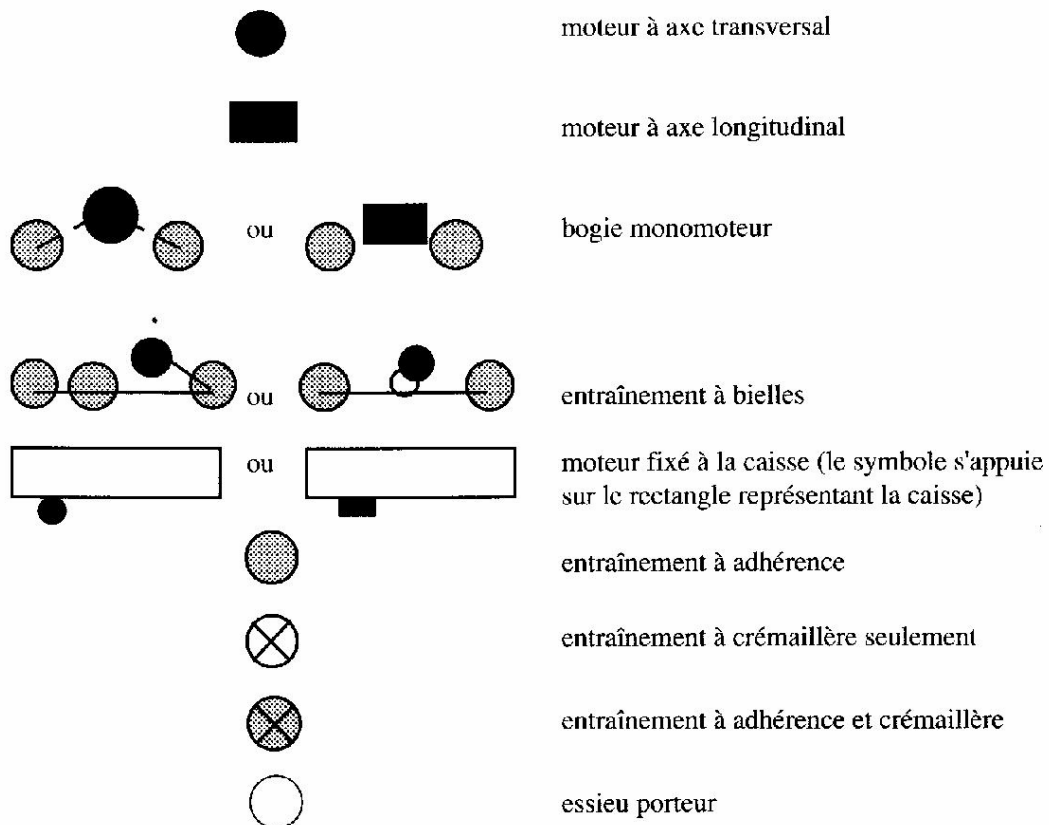


Fig. 8.4 Symboles : moteurs et essieux.



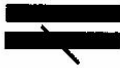









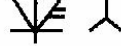


	Rhéostat de démarrage/freinage	
	Transformateur à réglage haute tension	
	Transformateur à réglage basse tension	
	Commande à contacteurs	- électropneumatiques - électromagnétiques
	Commande à graduateur	
Rh	Frein rhéostatique (pour une commande à rhéostat, ce symbole est omis)	
Réc	Frein à récupération	
	Frein électrique absent	
	Frein à patin électromagnétique sur rail	
	Redresseur fixe à vapeur de mercure (ignitron, excitron)	
	Redresseur commandé par grille (excitron)	
	Redresseur fixe à diodes	
	Redresseur à thyristors	
	Hacheur	
	Onduleur pour moteur polyphasé	
	Groupe convertisseur tournant	
DE =	Moteur diesel avec génératrice à courant continu	
DE 	Moteur diesel avec alternateur	
DH	Moteur diesel avec transmission hydraulique	

Fig. 8.5 Symboles : équipement électrique.


pna	frein pneumatique à air comprimé	
pnv	frein pneumatique à vide	
hy	frein hydraulique	
epna	frein électropneumatique	
rub	frein à ruban	} inépuisables
ress	frein à ressort	
cli	frein à cliquet	
	frein électrique à courant de Foucault («Telma»)	

Fig. 8.6 Symboles : freins mécaniques.



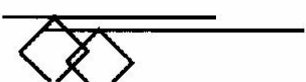





	V	Pantographe «classique»
	V	Pantographe «unijambiste»
	V	Pantographe triphasé
	V	Perche simple
	V	Perche double
	V	Patin sur 3 <sup>e</sup> rail
	V	Patin sur 3 <sup>e</sup> et 4 <sup>e</sup> rails
	V	Batterie

Fig. 8.7 Symboles : prise de courant.


	Emplacement des portes d'accès au compartiment voyageurs
A	Compartiment de première classe
B	Compartiment de deuxième classe
D	Compartiment-fourgon
R	Compartiment bar ou restauration
Clim	Climatisation
ChR	Chauffage à résistances
ChRv	Chauffage à air pulsé

Fig. 8.8 Symboles pour automotrices.



## 9.1 Technologie de la voie

La voie constitue un système dont les quatre composants principaux assurent une fonction nécessaire à l'objectif final du transport : le rail, les traverses, le ballast et la plateforme.

Le rail est une barre d'acier en trois parties ; la table de roulement est la face supérieure du champignon permettant le roulement de la roue.

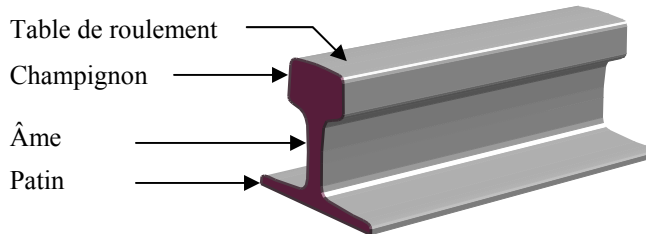


Fig. 9.2 Profil du rail

Les traverses garantissent non seulement un écartement constant des rails, mais aussi transmettent au ballast les contraintes longitudinales des rails et leurs efforts transversaux, longitudinaux ou verticaux. Il existe de nombreux dispositifs de fixations des rails sur les traverses ; les fixations de type récent ne permettent pas le glissement longitudinal du rail.

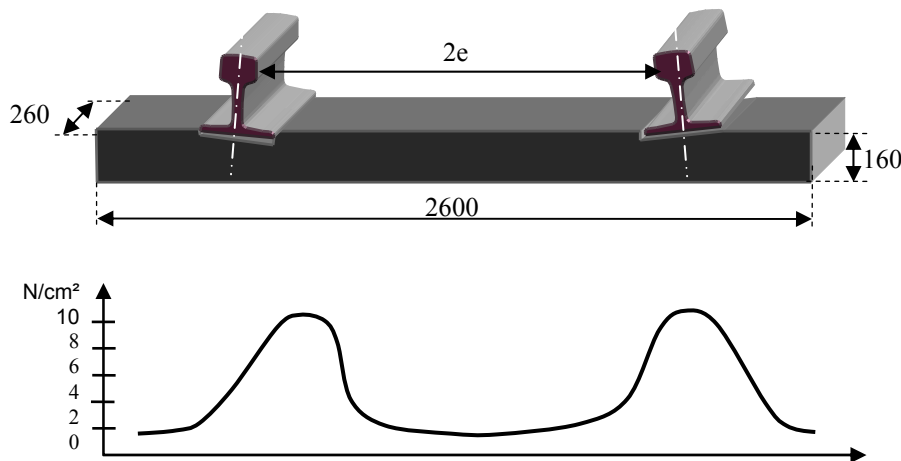


Fig. 9.6 Répartition des contraintes sur une traverse

La plateforme fixe le tracé et assure l'écoulement des précipitations et le ballast retient les traverses dans toutes les directions.

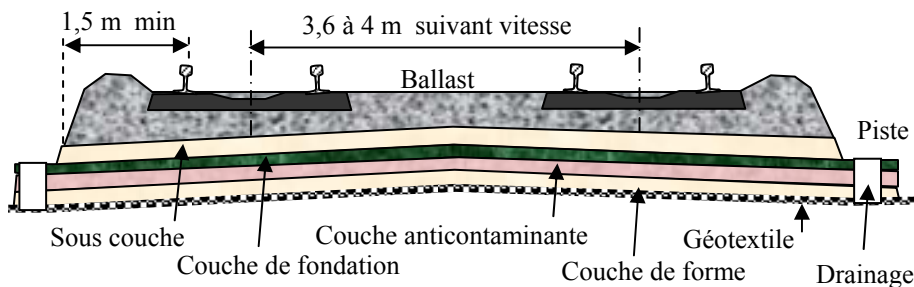


Fig. 9.10 Profil en coupe de la voie

En courbe, la pose de la voie prévoit un dévers pour que la composante des forces soit tant que faire se peut perpendiculaire au plan de la voie lors d'une circulation à vitesse prévue

pour la ligne. Le dévers est limité par le risque de basculement vers l'intérieur lors d'un démarrage de train arrêté en courbe. En cas d'insuffisance de dévers, le moment de force exercé sur la caisse risque de faire basculer le véhicule à l'extérieur. La pendulation des caisses permet d'atteindre une composante perpendiculaire au plancher pour les passagers, en acceptant une insuffisance de dévers pour le véhicule sur le rail. Elle permet d'augmenter la vitesse de circulation en courbe en préservant le confort des voyageurs, sans toutefois approcher les limites de déraillement décrites dans cette section et la suivante.

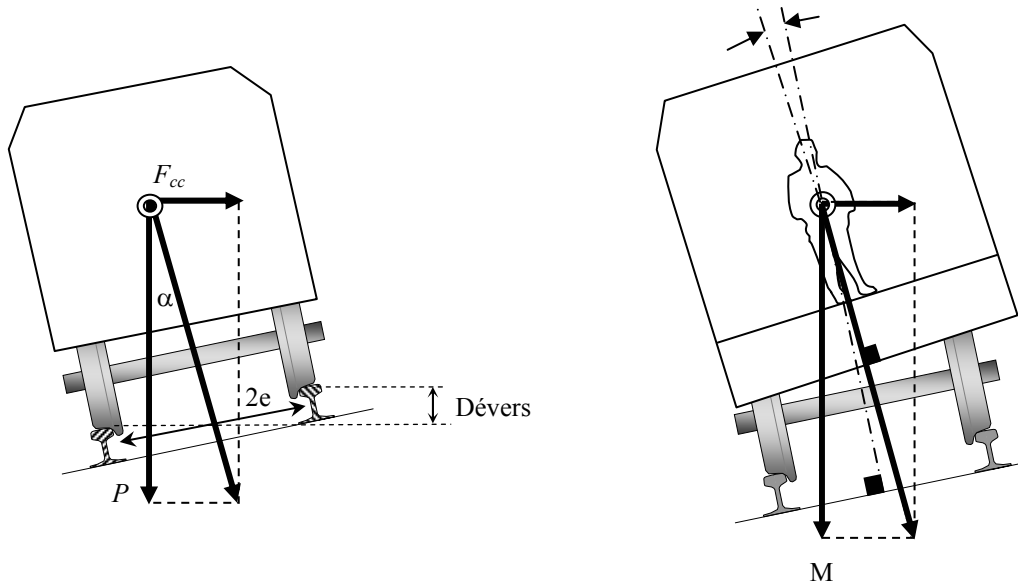


Fig. 9.16 Force en courbe et dévers.

## 9.2 Circulations sur rails

Le dicône du plan de la bande de roulement des roues par rapport à la table de roulement des rails garantit le centrage de l'essieu sur la voie de telle sorte que le boudin des roues n'entre presque jamais en contact avec les flancs internes du champignon. Il assure la fonction d'un « différentiel automatique » permettant, en courbe, le roulement de chaque roue sur des diamètres différents, correspondant aux chemins à parcourir distincts.

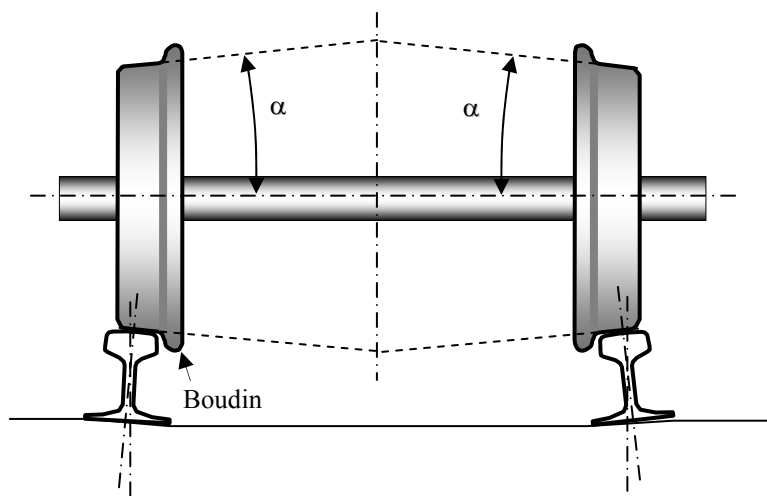
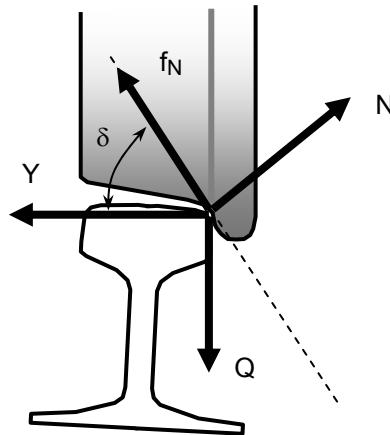


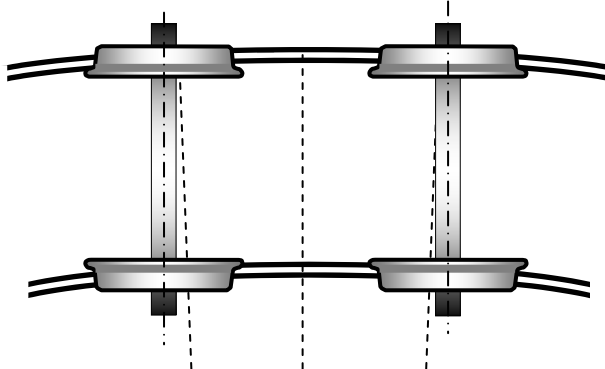
Fig. 9.24 Profil de roue et pose des rails.

La vitesse de circulation en courbe doit être limitée pour éviter que la composante de force ne provoque le passage du boudin au-dessus de la table de roulement, ce qui provoquerait un déraillement. En pratique, la force centrifuge  $Y$  ne doit pas excéder 150 % du poids  $Q$ .



**Fig. 9.30** Efforts au déraillement.

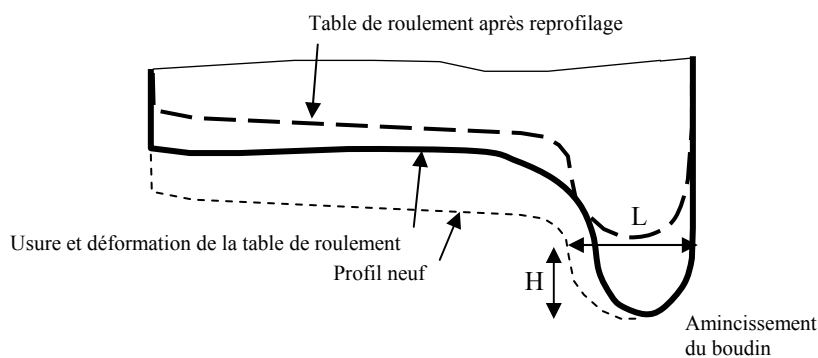
En général, les essieux ne sont pas alignés avec la direction de courbure de la voie. Groupés en bogies, les essieux forme un angle avec la direction radiale, qui accentue encore le risque que le boudin grimpe sur le champignon.



**Fig. 9.31** Bogie en courbe.

On peut encore mentionner la limite de Prud'homme, dépassée lorsque la force centrifuge  $Y$  ne peut pas être contenue par l'appui des traverses sur le ballast.

L'usure des profils de roue compromet la bonne marche des véhicules, tant en alignement qu'en courbe et nécessite un reprofilage régulier.



**Figure 9.33** – Usure de la roue

### 9.3 Appareils de voie

Le principe de roulement d'essieux à roues à boudins sur une paire de rails d'acier induit la nécessité de systèmes relativement complexes pour les changements d'itinéraire. Les éléments essentiels sont les lames mobiles qui guident les boudins, et les lacunes nécessaires à leur passage qui font défaut sous la bande de roulement pour l'autre itinéraire. Au passage de la lacune, la roue « tombe » puis percute le rail ou la pointe de cœur.

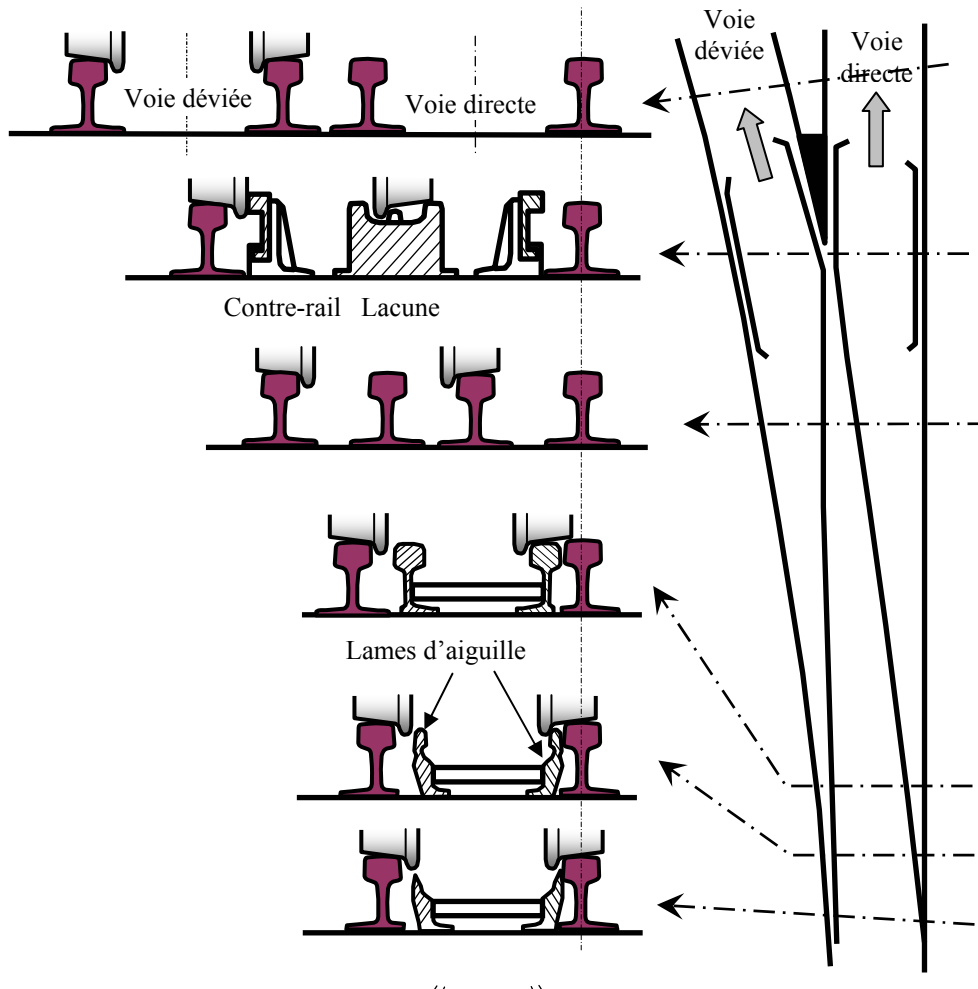


Fig. 9.37 Cinématique au franchissement d'un branchement.

### 9.4 Voies spéciales

Comme mentionné en section 5.9, l'effort de traction peut être transmis par une roue dentée sur un rail à crémaillère. Sauf exception (Santos-Jundiai) la crémaillère est implantée suffisamment haut dans l'axe de la voie pour garantir le passage des roues dentées du véhicule moteur au-dessus des tables de roulement aux appareils de voie.

### 9.5 Voies sans contact

Ce sont des systèmes extrêmement complexes de guidage et sustentation magnétique pour véhicules « légers », incompatibles avec la voie ferrée classique.

## 9.6 Gabarits

Les obstacles fixes le long de la voie, y compris un jeu pour les imprécisions et les mouvements doivent laisser un espace libre plus grand que la taille des véhicules, y compris les jeux liés à l'imprécision de pose de la voie et aux mouvements latéraux dus aux courbes ou aux suspensions.

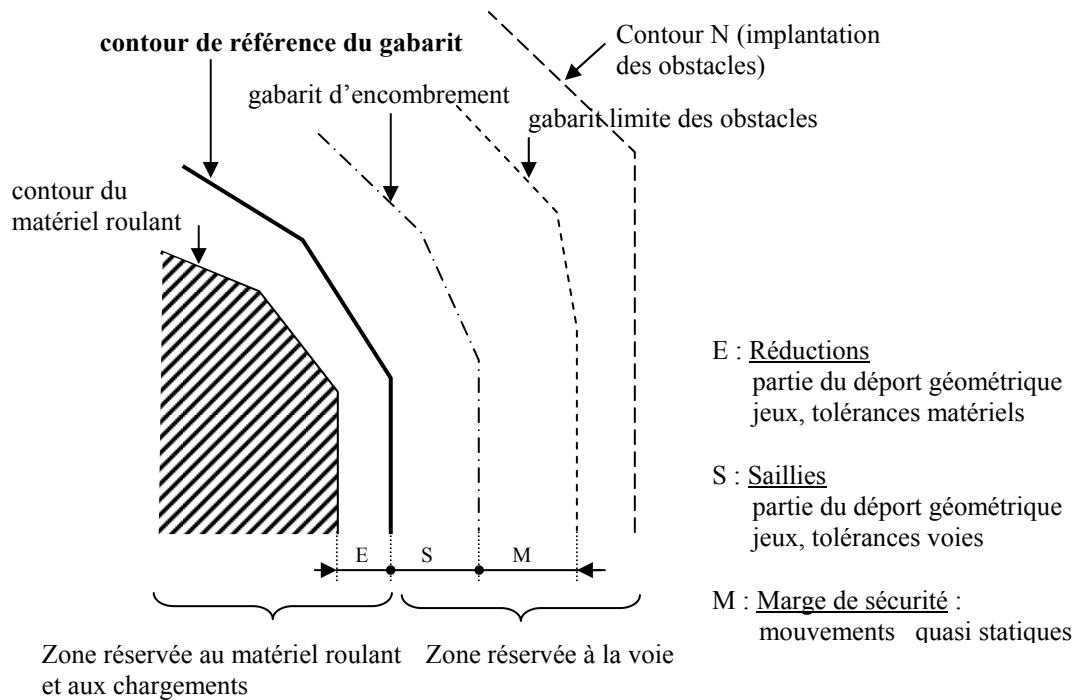


Fig. 9. 52 Marges de sécurité des gabarits

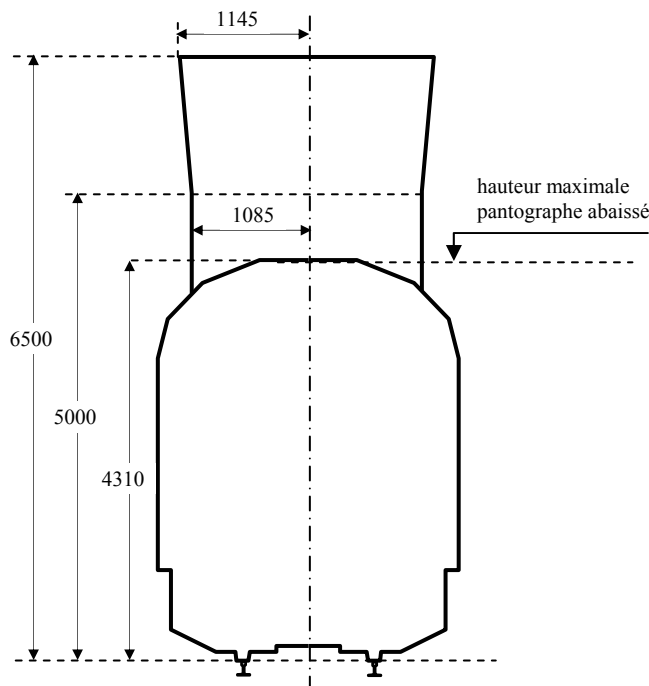


Fig. 9. 54 Exemple de gabarit de véhicule de traction électrique (ligne aérienne)



## 10.1 Topologie dynamique

Le système complet est composé d'un circuit déformable entre la fourniture d'énergie par la sous-station et le train. La sous-station fournit l'énergie à un niveau de tension adapté aux possibilités d'utilisation par un engin de traction, elle la reçoit selon d'autres caractéristiques, adaptées au transport, depuis le lieu de production.

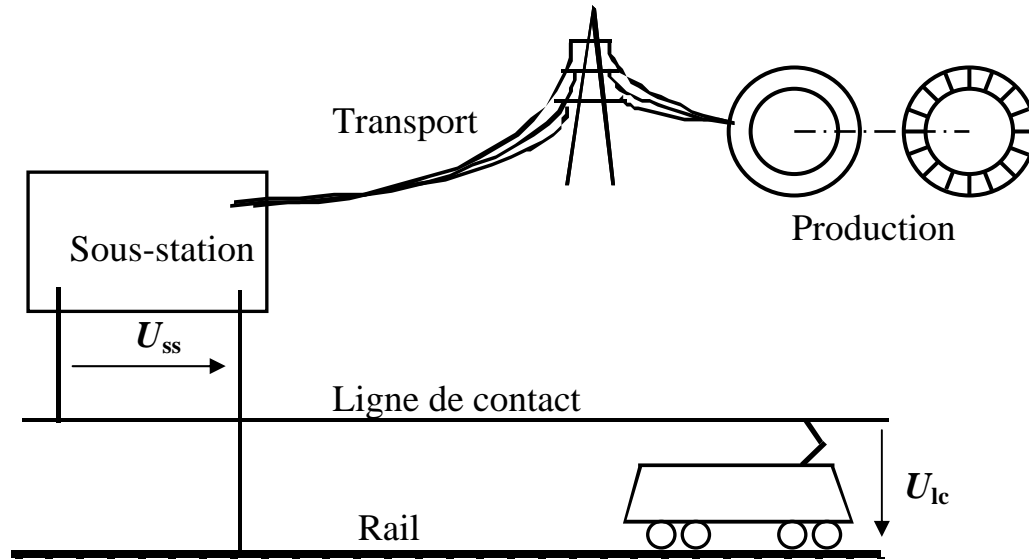


Fig. 10.3 Disposition schématique de la traction électrique.

## 10.2 Constitution du circuit de traction

Le circuit de traction est composé de deux conducteurs très différents :

1. La ligne de contact isolée des supports, de caractéristique bien connue à la construction.
2. Les rails et le terrain environnant dans lesquels le courant se répartit de manière indéterminée.

Cependant, on peut établir un schéma simplifié qui tient compte de toutes les impédances.

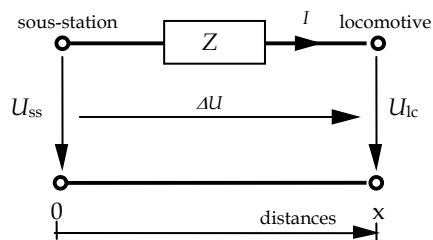


Fig 10.4 Circuit de traction : schéma simplifié.

Comme l'impédance  $Z$ , pour un type de construction donné, dépend de la distance, on parle souvent d'impédance linéique. On a calculé quelques valeurs pour des lignes de contact pour voies à trafic standard, en choisissant des valeurs moyennes pour le conducteur de terre. On notera que la construction de la voie nécessite des dispositions soigneuses pour garantir la continuité électrique afin que l'essentiel du courant passe par les rails.

	Impédance linéique [ $\Omega/\text{km}$ ]	
	Simple voie	Double voie
1,5 kV=	0,07	0,05
3 kV=	0,08	0,06
15 kV 16,7 Hz	$0,08 + j 0,13$	$0,05 + j 0,08$
25 kV 50 Hz	$0,13 + j 0,35$	$0,09 + j 0,21$

Fig. 10.10 Impédances linéiques de lignes typiques.

La tension effectivement disponible pour l'engin de traction est la tension délivrée par la sous-station, à laquelle on soustrait la chute de tension en ligne. Cette chute de tension dépend de la distance à la sous-station et de l'intensité du courant demandé par l'engin de traction. Toutes les lignes ne sont pas alimentées par une seule sous-station, mais en particulier en continu, on peut alimenter un tronçon de longueur  $d$  par les deux extrémités.

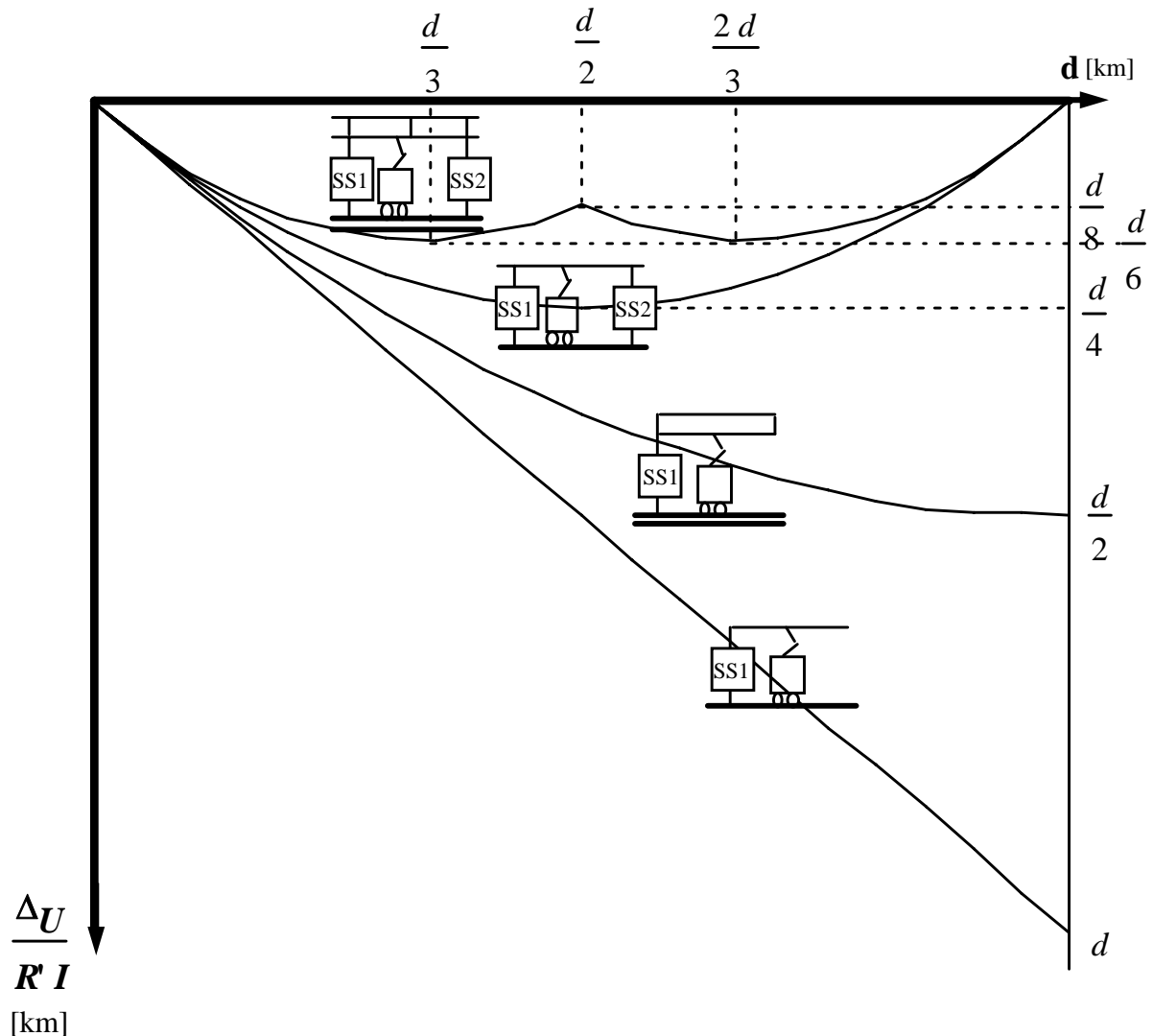
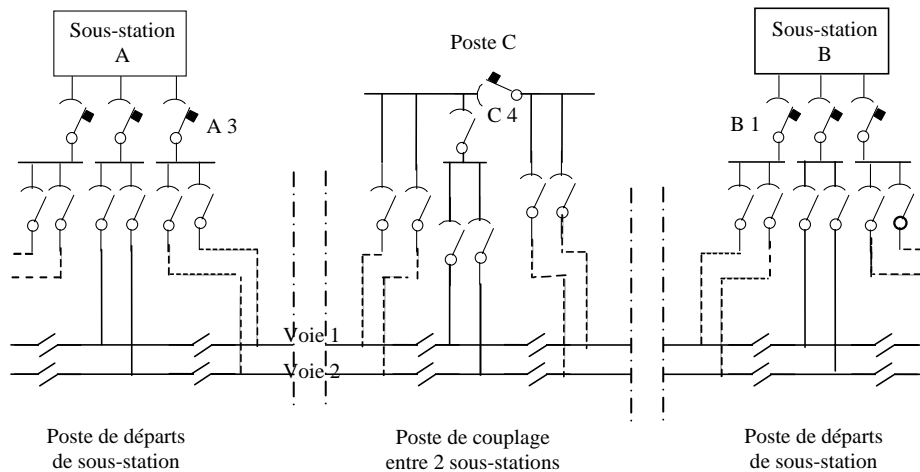


Fig. 10.17 Chutes de tension relatives en ligne.



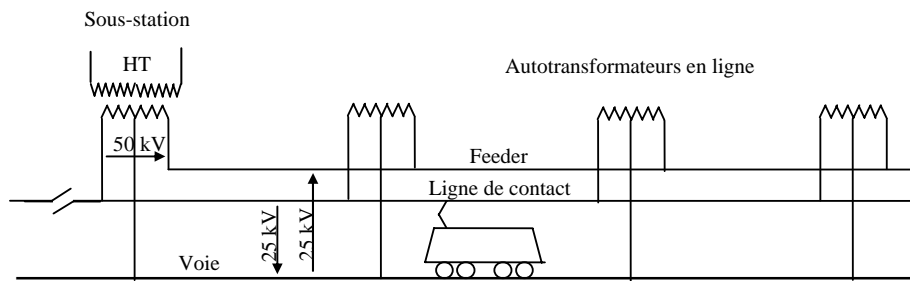
## 10.2 Constitution

Les sous-stations et la ligne de contact sont reliées par des contacteurs qui permettent différentes architectures du circuit de traction. Il faut rendre attentif au fait que la mise en parallèle des sous-stations continues ne pose pas problème, mais que pour les sous-stations monophasées, il faut prendre garde à leur phase si on veut alimenter en parallèle la même section de ligne de contact.



**Fig. 10.46** Couplage entre deux sous-stations

Pour diminuer l'impédance linéique en monophasé, on a volontiers recours à l'alimentation en double tension, avec des autotransformateurs en ligne.



**Figure 10.48** Alimentation double monophasé

	Intervalles entre sous-stations [km]	Puissance par sous-station [MVA]
<b>Continu 1500 V</b>	8 à 14	3 à 12
<b>Monophasé 16,7 Hz 15 kV</b>	30 à 60	10 à 30
<b>Monophasé 50 Hz 25 kV</b>	30 à 60	10 à 30
<b>Monophasé 50 Hz 2 x 25 kV</b>	40 à 90	30 à 60

**Tableau 10.52** Intervalles et puissances des sous-stations selon les systèmes

C'est le transformateur qui définit la puissance nominale que peut fournir une sous-station, et il peut être surchargé pendant un temps court (p.ex.  $200\% * P_n$  pendant 2 minutes). Pour les sous-stations à tension continue, la surcharge sera toutefois limitée par le courant maximal que peut conduire le redresseur.

## 10.3 Alimentation

Les lignes de contact monophasées à fréquence industrielle sont alimentées depuis le réseau triphasé général (fig. 10.53a) par des sous-stations triphasées – monophasées abaisseuses de tension. On veille à équilibrer au mieux la charge sur les trois phases du réseau d'alimentation pour les sous-stations qui se succèdent sur une ligne.

Les lignes de contact à tension continue sont alimentées également depuis le réseau triphasé général (fig. 10.53c) par des sous-stations comportant transformateur et redresseur triphasé. Au début de la traction électrique, on a pu observer des centrales de production à tension continue qui alimentaient directement la distribution sur la ligne de contact.

Les lignes de contact à fréquence spéciale peuvent être alimentées depuis des centrales de production et un réseau d'alimentation en monophasé à fréquence spéciale (fig. 10.53b), par des sous-stations de transformateurs monophasés, depuis le réseau général triphasé (fig. 10.53d) par des sous-stations de conversion de fréquence ou par une combinaison de ces deux modes.

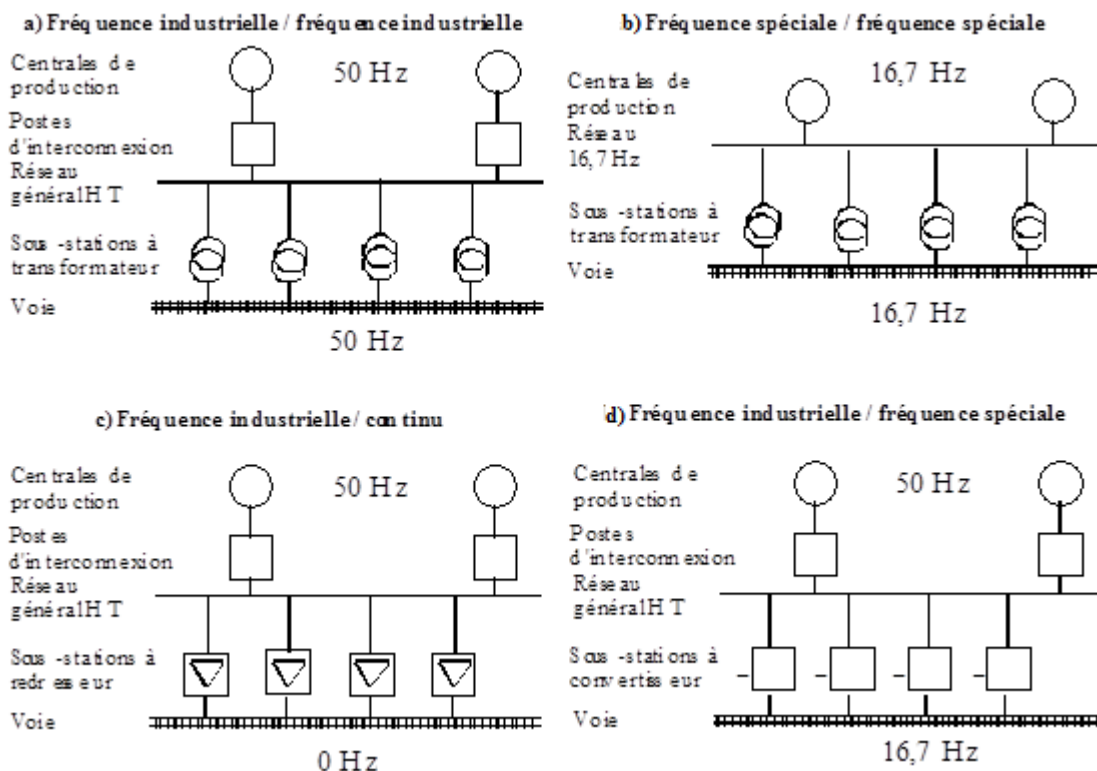


Fig. 10.53 Différentes possibilités d'alimentation.

Pour la conversion de fréquence, on a d'abord utilisé des convertisseurs tournants : rigides pour des réseaux à fréquence spéciale sans production propre, souple pour ceux qui ont leur production propre. On fait maintenant appel à des convertisseurs statiques à circuit intermédiaire à tension continue (convertisseur U). Tant côté triphasé que monophasé, on a une mise en cascade de plusieurs convertisseurs élémentaires, afin de garantir un faible taux d'harmoniques dues au hachage. Les premières réalisations ont fait appel à des GTO (CFF: Giubiasco) [122]. Les réalisations récentes font appel aux IGCT (DB: Bremen) [123] qui ont permis une diminution des pertes par conduction, – 25 %, une réduction d'un facteur 5 à 6 de la puissance du dispositif de commande de gâchettes et des temps de commutation réduits d'un facteur 6 à 8. Ces temps de commutation sont comparables à ceux des IGBT, qui ont eux des pertes par conduction plus élevées. La structure d'un IGCT est très comparable à celle d'un IGBT de même gamme, ce qui permet de profiter des gains de quantité dans les coûts de production.

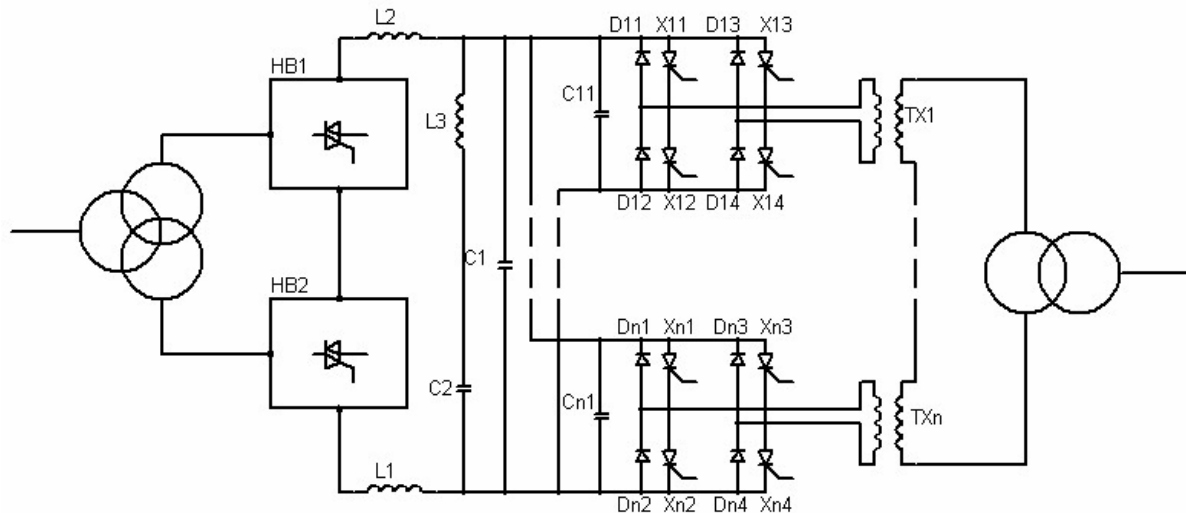
Ces équipements sont réversibles.

d'un IGBT de même gamme, ce qui permet de profiter des gains de quantité dans les coûts de production.

Ces équipements sont réversibles.

On envisage même de tels équipements entre le 50 Hz triphasé et le 50 Hz monophasé [147]. Pour un surcoût de construction aujourd'hui modique par rapport aux simples transformateurs, on diminue les coûts d'exploitation :

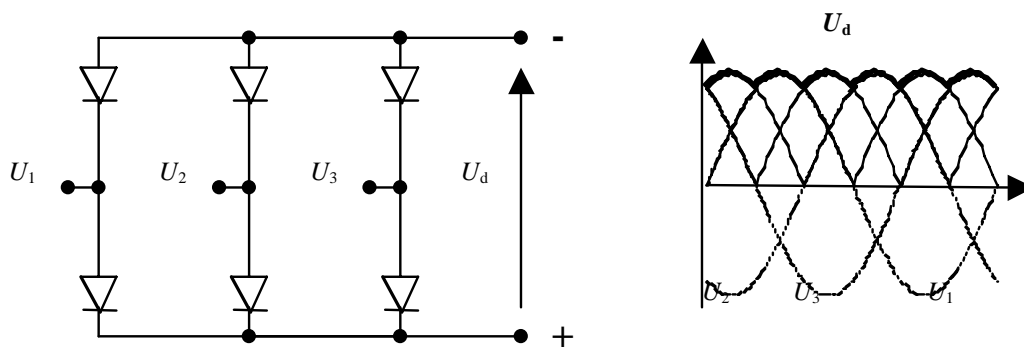
- Pas de pénalités pour asymétrie de consommation à payer au fournisseur d'énergie.
- Harmoniques absorbées par les filtres du circuit intermédiaire.
- Puissance réactive fournie par le circuit intermédiaire.
- Réglage de tension de la ligne de contact à la valeur maximale admise lorsque la sous-station fournit de la puissance et à la valeur minimale lorsqu'elle en absorbe.



**Transformateur triphasé à 50 Hz**    **Convertisseurs**    **Circuit intermédiaire**    **Convertisseurs en parallèle**    **Transformateurs à secondaires en série**    **Transfo. 16.7 Hz**

**Fig. 10.62** Convertisseur de fréquence.

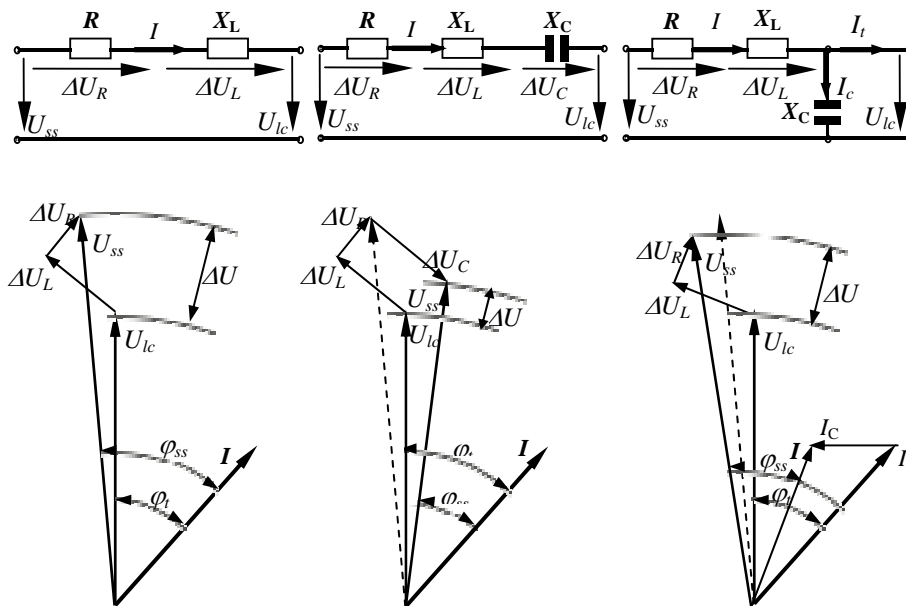
Pour alimenter les lignes à tension continue, on n'utilise plus aujourd'hui de machines tournantes ni de redresseurs à vapeur de mercure qui ont jalonné les premières décennies de la traction électrique. Le plus souvent, on utilise des redresseurs unidirectionnels à diodes.



**Fig.10.64** Redresseur en pont triphasé

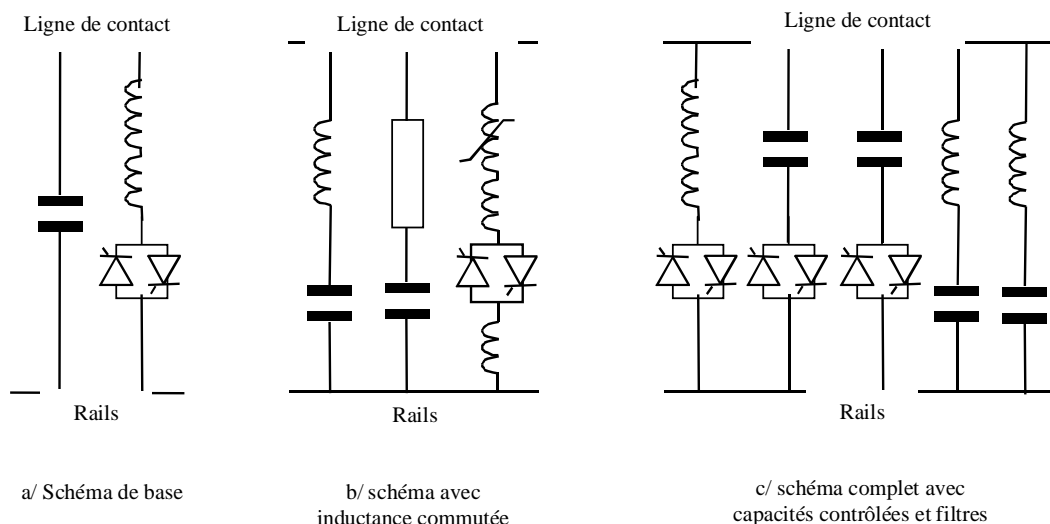
On a vu qu'en monophasé, l'impédance linéique est complexe (fi. 10.10). Cela entraîne non seulement que la tension disponible pour l'engin de traction est plus faible qu'à la sous-station, mais en plus, elle est décalée en phase (fig.10.69a). Plutôt que de diminuer l'intervalle entre sous-station, ce qui peut se révéler très coûteux, on peut implanter des batteries de condensateurs en série dans la ligne de contact (RhB, NSB, fig. 10.69b) ou en

parallèle (SNCF, fig. 10.69c). Non seulement la tension disponible à la ligne de contact est plus élevée, mais la puissance réactive que doit fournir la sous-station est plus faible : la différence de phase  $\varphi_{ss}$  entre la tension  $U_{ss}$  à la sous-station et le courant  $I$  fourni est plus faible.



**Fig. 10.69** Compensation des chutes de tension en monophasé par condensateur.

Plutôt que d'utiliser des composants passifs qui ne révèlent toute leur action que dans certaines portions de ligne pour des cas de charges limités, on s'oriente maintenant vers des compensateurs statiques (SVC) qui combinent batteries de selfs et compensateurs et semiconducteurs commandés par un logiciel qui surveille tensions et courants à la ligne de contact. La valeur d'impédance peut ainsi être adaptée en temps réel aux conditions de charges de la ligne de contact.

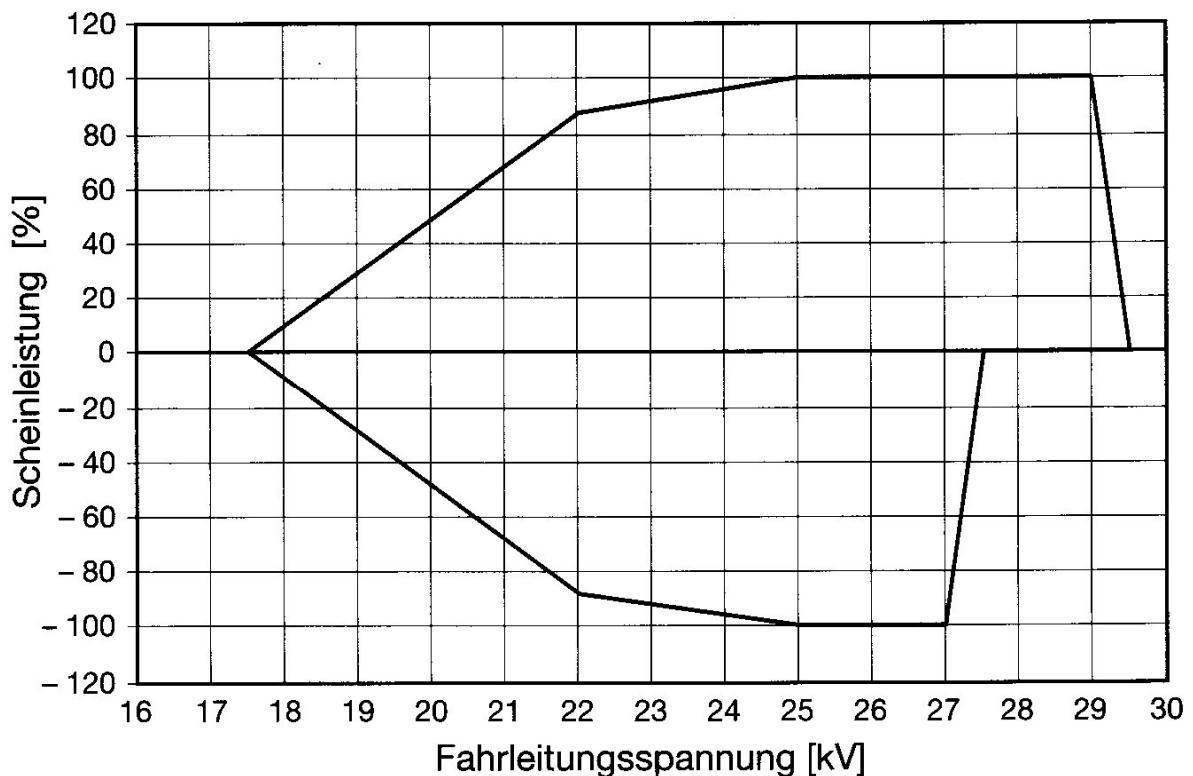


**Fig. 10.71** Compensateurs statiques de puissance réactive.

## 10.5 L'impact des véhicules moteurs et sa maîtrise

On a vu en section 10.2 l'effet du courant appelé par l'engin de traction sur la valeur de la tension à la ligne de contact. Selon les directives de l'UIC, on admet que la tension à la ligne de contact peut varier de  $-30\%$  à  $+20\%$  autour de la valeur nominale.

Dans les véhicules modernes commandés par processeurs, cette donnée est intégrée à la commande et un programme empêche toute demande de courant lorsque la tension est minimale et tout renvoi de courant lorsqu'elle est maximale, afin de ne pas sortir de l'intervalle autorisé. Autour de la valeur nominale de la ligne de contact, la puissance maximale du véhicule est autorisée et la valeur de puissance demandée par le personnel de conduite est appliquée à l'équipement.



**Fig. 10.83** Limitation de la puissance apparente en fonction de la tension à la ligne de contact, exemple à 25 kV.

La figure 10.83 présente un exemple, mais la caractéristique ne doit être considérée que comme un principe : sa forme sera déterminée en accord avec les caractéristiques du réseau sur lequel l'engin de traction devra circuler, mais on veillera toujours à une application progressive de la limitation : fonction sans discontinuité. Pour une ligne de contact à tension continue, le principe est le même. On est ainsi sûr de disposer encore de la puissance suffisante pour les auxiliaires (voir chap. 6), sauf si la tension est totalement absente.

Pour une ligne de contact monophasée, il y a lieu d'agir aussi sur le facteur de puissance, toujours afin d'éviter de sortir des limites prescrites. Autour de la valeur nominale de la ligne de contact, on impose un facteur de puissance de 1, autrement dit une puissance réactive de 0%. Il est évident que cette condition ne peut être atteinte qu'avec des

convertisseurs à pulsation côté ligne de contact, pour lesquels il est possible d'ajuster le facteur de puissance.

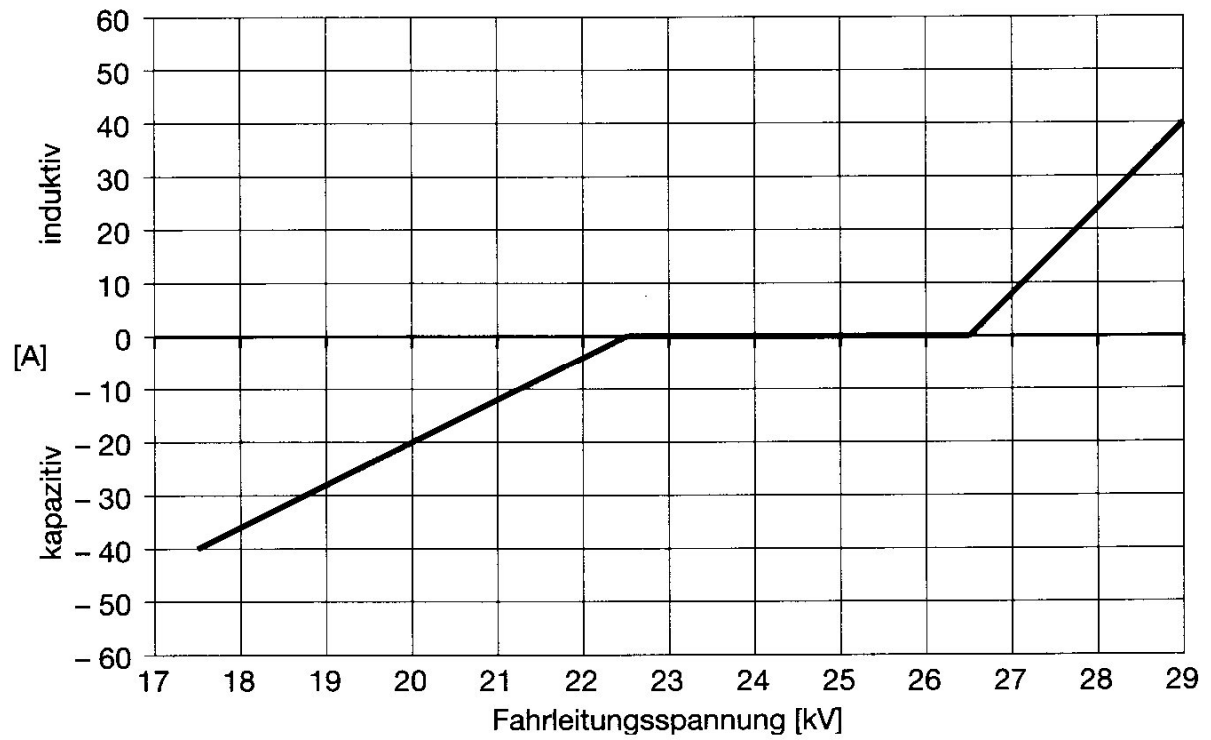


Fig 10.84 Imposition de la puissance réactive en fonction de la tension à la ligne de contact, exemple à 25 kV.

## 11.1 Généralités

La distribution de l'énergie électrique le long d'une ligne de chemin de fer nécessite deux conducteurs de courant en alimentation en monophasé<sup>1</sup> ou sous tension continue. (sect. 9.6) L'un des conducteurs est naturellement constitué par les rails de roulement ; le second, isolé par rapport aux rails, peut être :

- soit « aérien », disposé au-dessus du véhicule ;
- soit fixé au sol, latéralement ou dans l'axe de la voie (pas décrit en détail ici).

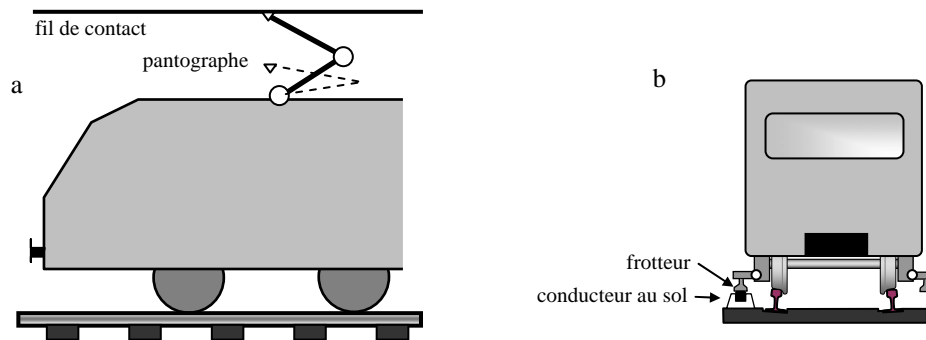


Fig. 11.1 Prises de courant aérien et au sol.

## 11.2 Dynamique

La ligne aérienne est constituée d'un fil –de cuivre – tendu entre des isolateurs portés par des mâts.

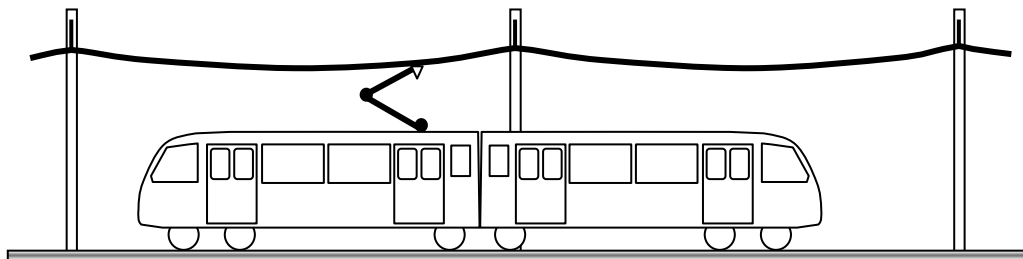


Fig. 11.3 Ligne de contact aérienne

Au-delà d'une certaine vitesse, 60 km/h environ, la qualité du captage exige une hauteur la plus constante possible du fil de contact par rapport au rail. Ceci revient à supprimer la flèche naturelle de la chaînette. Trois solutions sont envisageables :

- multiplier le nombre de supports de sorte que la raideur du fil de contact rende la flèche négligeable. Solution incompatible au point de vue économique, sans exclure la nuisance esthétique qu'elle engendrerait.
- augmenter la section du fil de contact jusqu'à ce que son inertie rende la flèche également négligeable entre deux supports. Dans certaines configurations, notamment de gabarit réduit en tunnel ou en tranchée, cette solution, appelée « contact rigide », est utilisée.

<sup>1</sup> Trois conducteurs sont nécessaires dans le cas d'une alimentation en triphasé, comme en Italie jusque dans les années 1960

- introduire des supports intermédiaires, appelés « pendules », entre le fil de contact et un câble porteur accroché aux supports. Cette association est la plus largement utilisée et constitue la « suspension caténaire » représentée en fig 12.4.

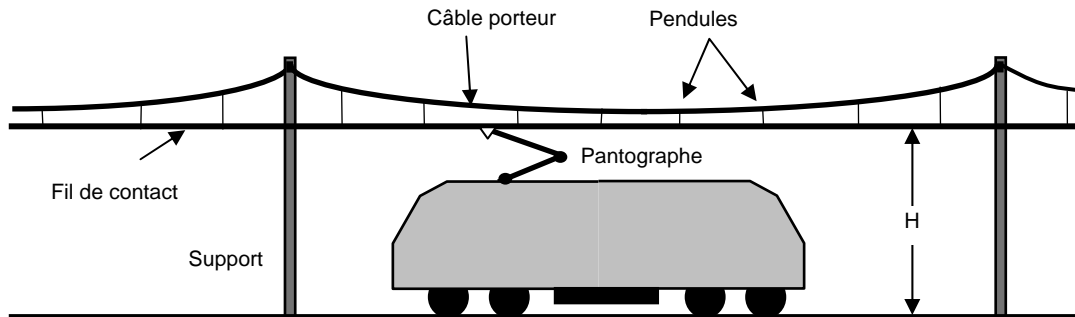


Fig. 11.4 - Schéma de principe de ligne de contact à suspension caténaire

### 11.3 Couple : ligne de contact – pantographe

De la bonne adéquation entre les caractéristiques dynamiques du pantographe et celles de la ligne aérienne dépend la bonne qualité du captage du courant et les longévités du fil de contact et du frotteur. Le pantographe doit appuyer avec une force suffisante pour rester en permanence en contact avec le fil, sans toutefois le soulever exagérément, ce qui lui ferait perdre le contact après le passage aux points de fixation.

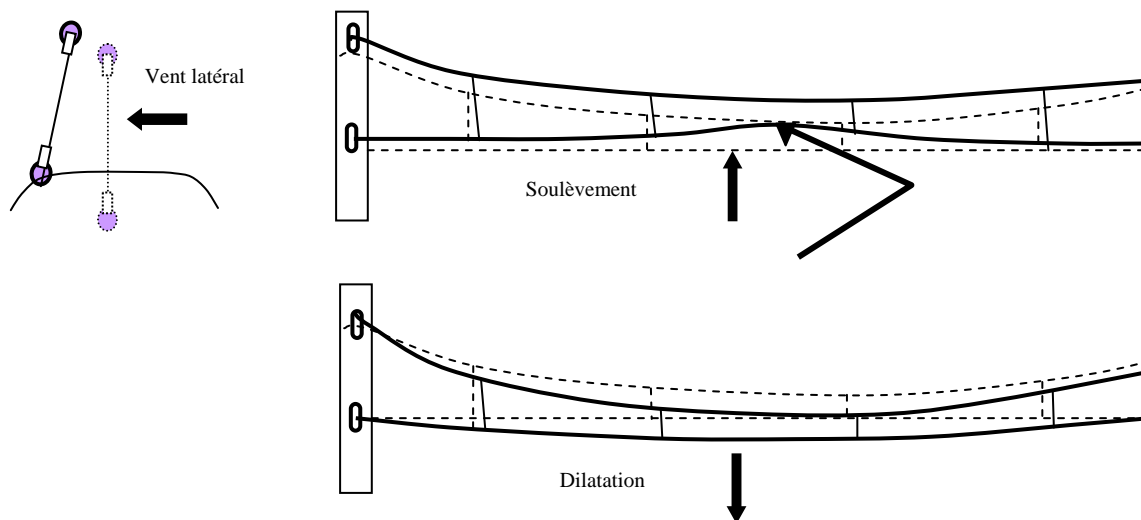


Fig. 12.5 Facteurs influençant le comportement dynamique de la ligne de contact

### 11.4 Technologie

La section circulaire du fil de contact comprend deux rainures pour la prise des griffes de suspension (fig 11.9). Selon la tension d'alimentation et des puissances demandées, la section varie de 107 mm<sup>2</sup> à 150 mm<sup>2</sup>. Obtenue par tréfilage à froid, la section peut être cylindrique ou comporter un méplat pour augmenter la dimension du contact avec la semelle de frottement de l'appareil de prise de courant.



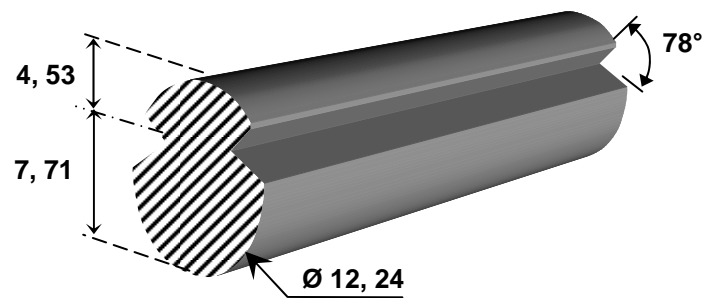


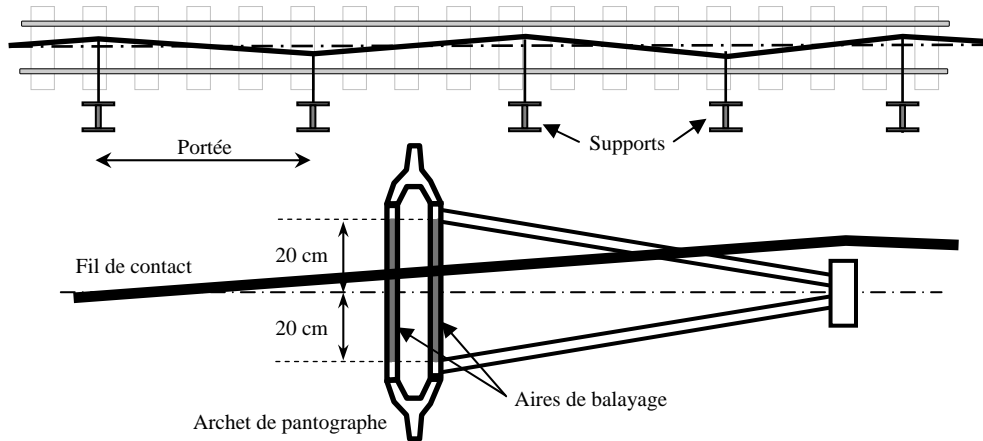
Fig. 11.9 Exemple de fil de contact

Le câble porteur doit assurer une bonne tenue mécanique à la traction, il est accroché aux supports. Pour diminuer la résistance électrique de la ligne, le fil de contact et le câble porteur sont mis en parallèle, soit à intervalles réguliers au moyen d'un shunt en cuivre, soit au niveau de chaque pendule, appelé pendule connexion, constitué par un câble. La caténaire est caractérisée par sa section « équivalence cuivre » exprimée en mm<sup>2</sup>. Les différents systèmes d'électrification font appel à des dispositions constructives particulières, fonction des intensités transportées.

Ligne de contact	Porteur	Fil de contact	Section équivalente cuivre	Poids au mètre linéaire
« tramway » 		cuivre dur 107 mm <sup>2</sup>	107 mm <sup>2</sup>	1,52 kg
1500 V compound 	Principal : bronze - Sn 116 mm <sup>2</sup> Auxiliaire : 143 mm <sup>2</sup>	cuivre dur 2 × 150 mm <sup>2</sup>	480 mm <sup>2</sup>	5,309 kg
3000 V simple 	Cuivre 120 mm <sup>2</sup>	cuivre dur 2 × 100 mm <sup>2</sup>	320 mm <sup>2</sup>	2,85 kg
15 kV 	Acier-cuivre 92 mm <sup>2</sup>	cuivre 1 × 107 mm <sup>2</sup>	189 mm <sup>2</sup>	1,85 kg
25 kV 	Al + acier 36 mm <sup>2</sup>	cuivre - Mg (ou Sn) 1 × 150 mm <sup>2</sup>	147 mm <sup>2</sup>	1,334 kg

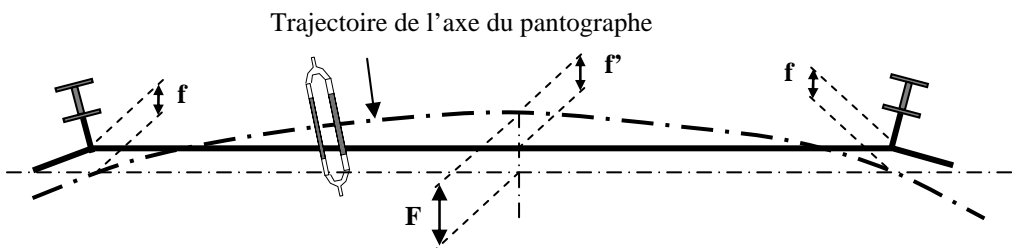
Tableau 11.12 – Caractéristiques principales de quelques types de caténares

Dans le plan, il est nécessaire que la pose de la ligne de contact présente un zig-zag par rapport à l'axe de la voie, de telle sorte que le point de contact de l'archet varie dans le temps. Un point de contact fixe conduirait au sciage de l'archet.



**Fig. 11.14** Désaxement périodique en alignement

En courbe, il faut prévoir un espacement des supports compatible avec la largeur de l'archet, en tenant compte des mouvements transversaux possibles.

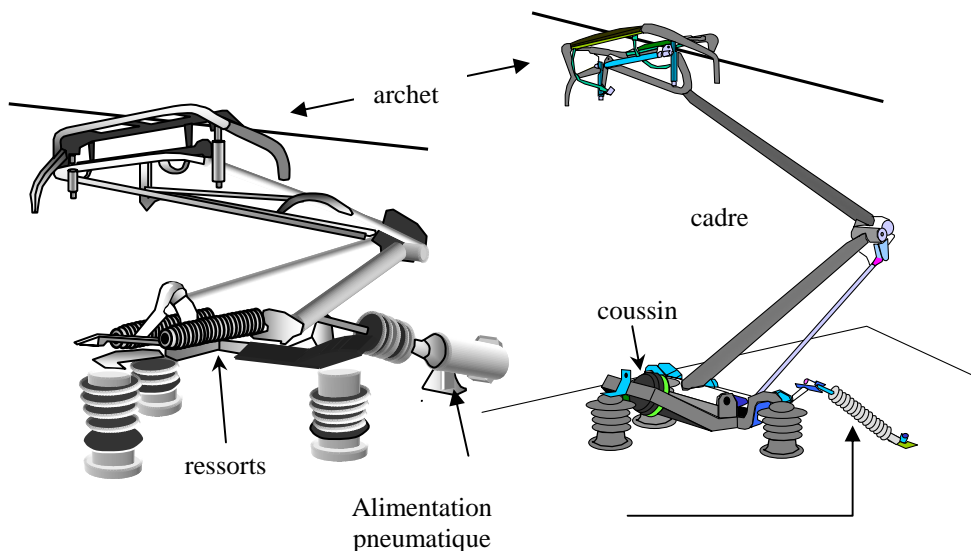


- $F$  : flèche de la courbe en milieu de portée =  $a^2/8R$
- $f$  : désaxement au droit du support
- $f'$  : désaxement en milieu de portée

**Fig.11.15** Désaxement en courbe

### 11.5 Appareils de prise de courant

Ce sont aujourd'hui des pantographes « légers » qui assurent la prise de courant.



**Fig. 11.28** – Deux exemples de pantographes

## 12.1 Installations de sécurité

### 12.1.1 Motivations

Dès qu'il s'est agit de faire circuler plus d'un train sur un réseau, il a fallu prévoir des dispositions pour éviter des conflits d'itinéraire entre les convois et réduire le risque d'accidents. La première étape fut celle des signaux visuels indiquant au personnel de conduite s'il pouvait ou non poursuivre sa route. Cela impliquait un respect rigoureux des signaux par le personnel du train et la sélection tout aussi rigoureuse des images des signaux – fermé ou ouvert – par le personnel responsable des circulations selon que la voie est disponible ou pas : c'est le principe du *cantonement*. [144, 152 - 155]. Les signaux devaient présenter une image sans ambiguïté. On les a d'abord réalisés avec des éléments mobiles, puis avec des éléments lumineux.













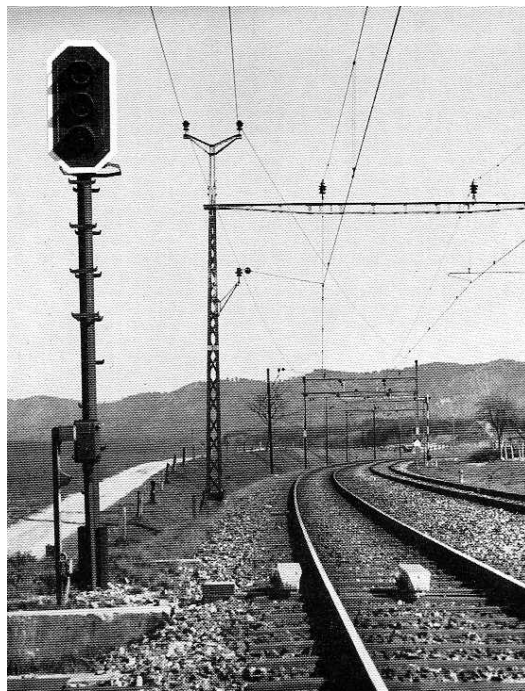
Image du signal		Image	Signification:
avancé	principal		
		–	Arrêt devant le signal principal
		1	Marche à la vitesse maximale indiquée dans l'horaire de service, mais ne figurant ni dans un cercle, ni dans un carré.
		2	Marche à la vitesse de 40 km/h si l'horaire de service ne prescrit pas, d'une manière générale, une vitesse plus faible.
		3	Marche à 65 km/h (catég. R) ou 60 km/h (autres trains). Si une vitesse est inscrite dans un cercle ou un carré dans l'horaire de service, c'est celle-ci qui fait foi.
		5	Marche à 95 km/h (catég. R) ou 90 km/h (autres trains).
		6	Marche compte tenu des dispositions ci-après: La vitesse ne doit pas dépasser 40 km/h – à partir du premier branchement si l'image 6 est présentée par le signal d'entrée; – à partir du signal de tronçon de voie si l'image 6 est présentée par ce signal. Le prochain signal ordonne l'arrêt.

Fig. 12.1 – Exemple de signaux lumineux : Suisse vers 1970.

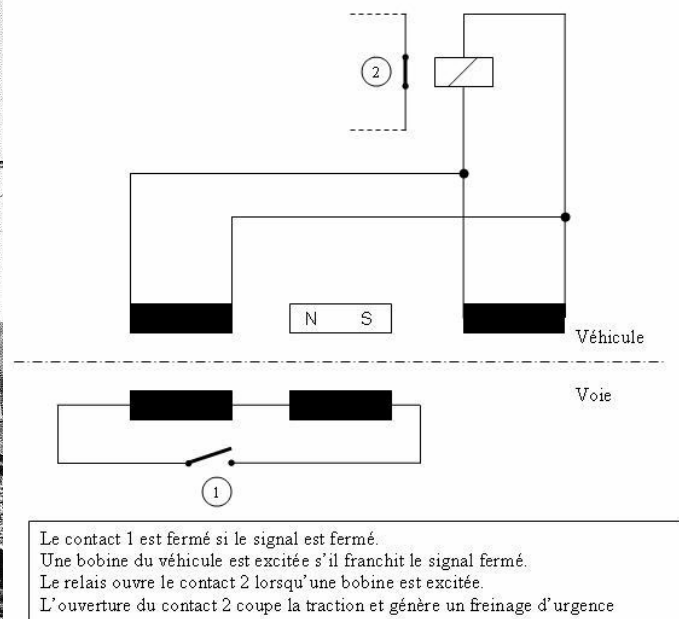
### 12.1.2 Développements de base

Des accidents liés à des erreurs humaines conduisirent à une deuxième étape: un dispositif au sol, conjugué avec le signal, donne un ordre d'arrêt d'urgence au train si ce dernier franchit de manière erronée un signal fermé à la suite d'une erreur du personnel de conduite : le disjoncteur principal est ouvert, ce qui interrompt brutalement l'effort de traction, et la conduite principale de frein est mise à l'air libre, ce qui provoque une action du frein sur l'ensemble du train. Pour palier aux erreurs du personnel des gares, on a aussi mis en place des systèmes qui empêchent de libérer un itinéraire s'il est déjà occupé par un autre convoi : on parle de *système de block*. La majorité des chemins de fer en sont à cette deuxième étape, avec des niveaux de sophistication plus ou moins grands. Même si ce sont à

peu près les mêmes fonctions qui sont assurées, ces systèmes sont incompatibles entre eux en raison de choix historiques.



A Disposition en pleine voie.



B Principe de fonctionnement

Fig. 12.2 – Exemple de dispositif de surveillance du franchissement d'un signal : *Signum*.

Les systèmes des différents réseaux ne sont toutefois pas totalement sûrs: il n'est par exemple pas toujours possible de prévoir une distance suffisante entre le signal de protection et le lieu d'interception de l'itinéraire antagoniste pour que l'arrêt d'urgence empêche une collision quelle que soit la vitesse du train "fautif". Ces dispositifs ponctuels peuvent être classés en deux catégories : les systèmes à contacts et les systèmes à induction. L'augmentation des vitesses conduisit à la pose de signaux avancés, informant le mécanicien qu'il devait arrêter son train au prochain signal ; la distance de visibilité du signal principal étant devenue plus courte que celle nécessaire à l'arrêt du train. Dans certains cas on eût même deux étapes de signaux avancés. Les vitesses augmentant encore, certains trains furent équipés de répétition de l'image du signal sur le pupitre de conduite, pour donner suffisamment de temps pour une lecture sûre.

### 12.1.3 Développements récents

L'augmentation du trafic et les lacunes des systèmes précédents ont amené une troisième étape à la fin du XX<sup>e</sup> siècle: un échange de télégrammes codés a lieu ponctuellement entre le sol et le train. Le contenu du télégramme est déterminé par l'image du signal qui protège le tronçon dans lequel le train s'apprête à s'engager. En fonction des informations reçues: vitesse à respecter à une distance donnée et déclivité sur cette distance, l'ordinateur calcule le profil limite d'arrêt ou de ralentissement en incluant les paramètres du convoi entrés en début de parcours par le conducteur du train. Ce système permet également de surveiller un dépassement de la vitesse maximale autorisée. Au droit du signal principal, une borne permet de donner à l'ordinateur de bord une nouvelle indication de vitesse autorisée, lorsque le signal est à nouveau ouvert.

L'ordinateur ne provoque un arrêt d'urgence que si le profil limite est franchi. On garantit ainsi que le train sera arrêté – manuellement ou par l'ordinateur – avant un signal fermé ou n'abordera pas à vitesse excessive un tronçon autorisé à faible vitesse. Ici aussi, on peut observer plusieurs systèmes analogues qui font appel à des solutions techniques différentes, mais incompatibles entre elles, pour assurer la transmission sol–train (KVB, ZUB, ...) [117, 118].

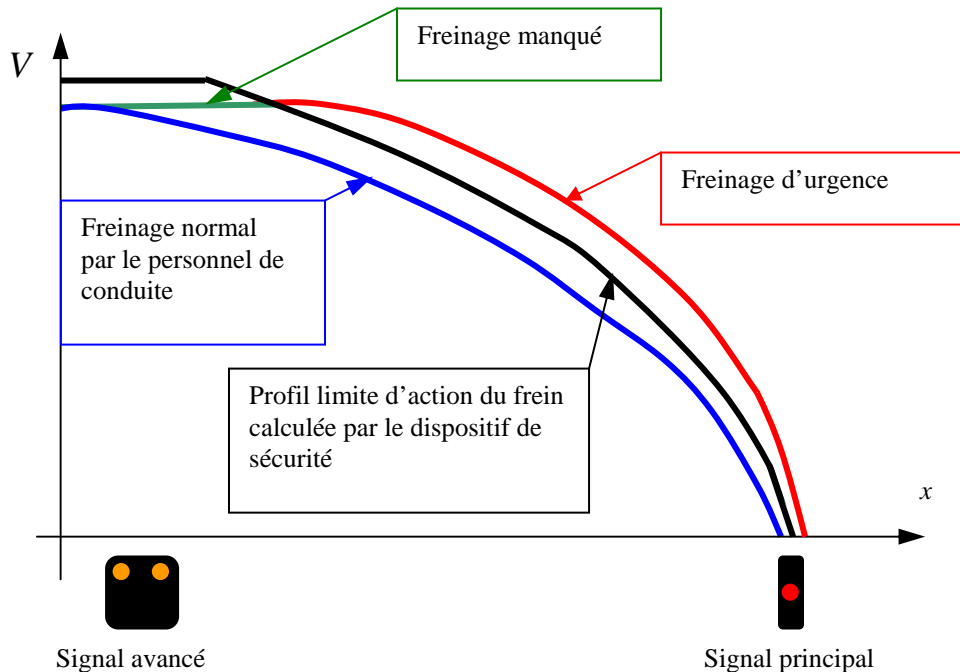


Fig. 12.3 – Profils de vitesse calculée et réelle.

Une quatrième étape est en cours: une normalisation européenne des transmissions sol–train (types d'onde et protocole de communication) avec une fonctionnalité encore plus étendue qui permet de surveiller la vitesse du train sur tout le parcours, voire d'assurer la conduite totalement automatique (ETCS : *European Train Control System*) [119, 120]. Au moment de la rédaction, plusieurs lignes pareillement équipées sont en cours de mise en service, affectées au trafic voyageurs, marchandises ou mixte. Avec un tel système, les tronçons à protéger ne seront plus forcément fixes par rapport au sol, mais pourront être définis par les autres convois en circulation: un train peut en suivre un autre à la distance nécessaire pour ne pas le percuter: ce système est appelé *cantonement mobile*. A terme, il n'y a même plus de signalisation visuelle en bord de voie. La fiabilité du dialogue sol–train doit être assurée en tout temps de même que la connaissance de la position du train par celui-ci et par l'organe de gestion du trafic. Les capteurs de vitesse sur l'arbre d'essieu donnent une mesure suffisamment précise pour la vitesse malgré le glissement de la roue sur le rail, mais pas pour la position, dans laquelle l'erreur peut s'accumuler jusqu'à entraîner des dysfonctionnements. Il faudra peut-être avoir recours à des dispositifs de positionnement par satellite (GPS, Galileo) ou au minimum à des bornes suffisamment rapprochées pour réinitialiser la position calculée à bord du véhicule.

### 12.1.4 Interopérabilité

La volonté de faire circuler des engins de traction sur les voies de différentes entreprises de chemin de fer conduit à la multiplication de dispositifs de sécurité. Non seulement il faut faire face à une place disponible fort limitée, mais on doit veiller à ce qu'un dispositif inutilisé ne perturbe pas d'autres installations.

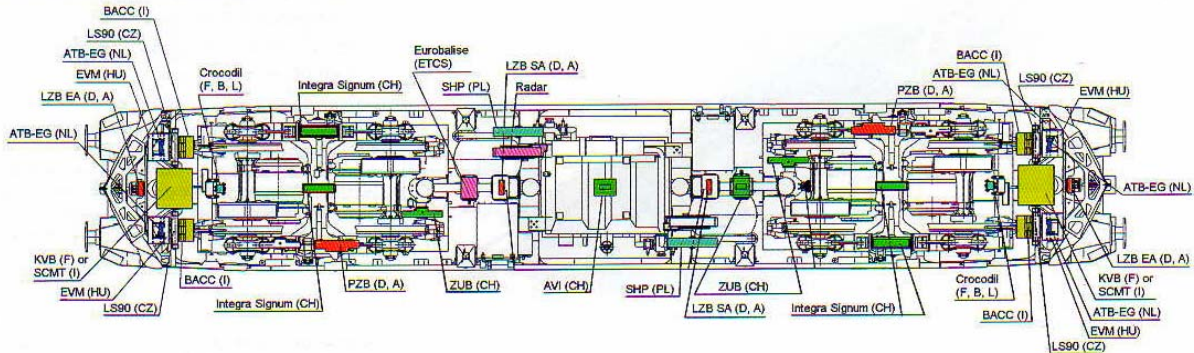


Fig. 12.4 – Dispositifs de sécurité sous une locomotive à quatre essieux.