

La circonférence du cylindre étant de $188^m/m5$ et la vitesse de rotation étant de 1 tour en 229 secondes on a :

$$K_2 = \frac{0^m1885}{229} = 0,0008231$$

On a par suite : $K = \frac{K_2}{K_1} = 0,0008231$

La section S du réservoir était de 2^m25 .

On a mesuré $\text{tg } \beta$ en construisant un triangle rectangle ayant pour hypoténuse la tangente à la partie initiale de la courbe. Les côtés qui mesurent respectivement 66 et $111^m/m$ donnent $\text{tg } \beta = \frac{66}{111}$

REMARQUE. — Si l'on avait pris la valeur de la tangente à la partie finale de la courbe on l'aurait trouvée légèrement inférieure. Pour plus de précision on aurait dû prendre la moyenne. Le débit calculé d'après la valeur précédente doit donc être un peu trop fort. Il est :

$$Q = 0,0008231 \times 2,25 \times \frac{66}{111} = 0^m3001101$$

c'est-à-dire 1 litre 101.

La quantité d'eau pesée pendant la durée de l'expérience correspondait à un volume de 167 litres.

Or, le graphique indique que la durée t de l'expérience proprement dite a été de :

$$\frac{\text{Quantité dont le cylindre a tourné.}}{\text{Vitesse de rotation du cylindre.}} = \frac{127^m/m}{0^m/m823} = 154,29$$

de sorte que le débit réellement écoulé était de :

$$167 : 154,29 = 1 \text{ litre } 083.$$

Le rapport entre le débit *pesé* et le débit *enregistré*, avec la valeur *maximum* de $\text{tg } \beta$, est :

$$\frac{1,083}{1,101} = 0,9845, \text{ soit une approximation de } 1,5 \%$$

Mais en se reportant à la remarque précédente, on peut conclure que l'approximation obtenue est très voisine de 1 % avec cet *appareil rudimentaire* et construit par nous-même dans le simple but de vérifier expérimentalement le principe du procédé. Avec un appareil de précision on obtiendrait certainement mieux.

On observera en outre qu'étant donné les défauts de construction que nous avons signalés, les chances d'erreurs sur ce très petit débit étaient beaucoup plus grandes que sur un débit considérable.

H. BELLET,

Ancien élève de l'Ecole Centrale Lyonnaise.

ÉTUDE SUR LE FREINAGE ÉLECTRIQUE

DES CHEMINS DE FER ET TRAMWAYS

I. — FREINS POUR COURANTS CONTINUS (Suite). (1)

Freinage des moteurs marchant en génératrices sur résistances. — Pour obtenir ce freinage les moteurs sont, comme nous l'avons vu (fig. 2), mis hors circuit par rapport au réseau et travaillent en génératrices sur des résistances réglables R .

(1) Voir le numéro de novembre 1903 de *La Houille Blanche*.

Il est évident que, dans ces conditions, ils fournissent un couple résistant, variable avec la vitesse, et d'autant plus énergétique pour une vitesse donnée que la résistance R est plus faible. Comme on le sait, le flux inducteur d'une dynamo-série ou shunt varie suivant une loi complexe, avec la vitesse, la résistance du circuit étant maintenue constante ; aussi, la prédétermination exacte de la courbe des variations de vitesse n'est guère possible dans ces deux cas et l'on doit se contenter d'approximations plus ou moins grossières en les ramenant au cas de moteurs à excitation séparée, c'est-à-dire, en supposant le flux inducteur constant pendant le freinage, par suite de la saturation du circuit magnétique (1).

Cette hypothèse simplifie beaucoup les équations générales et donne suffisamment l'allure des courbes de variations de vitesse ; d'ailleurs, nous le verrons, le calcul exact n'offrirait qu'un intérêt théorique et l'on peut, par des méthodes graphiques très simples, exposées plus loin, résoudre d'une manière satisfaisante la plupart des questions qui se présentent en pratique.

Dans ce qui suit, nous donnerons donc d'abord la théorie algébrique approchée du freinage, puis nous examinerons le fonctionnement avec plus de détails au moyen de constructions graphiques. Nous étudierons enfin les divers modes de couplage des moteurs et les applications de ce genre de frein.

EQUATIONS GÉNÉRALES. — D'après les hypothèses faites (flux inducteur constant), le courant I et le couple résistant dû à ce courant sont proportionnels à la vitesse v pour une résistance R de la variable ; l'effort correspondant à la jante peut donc se représenter par une expression de la forme αv . Quant aux efforts φ dus aux frottements du moteur et des engrenages et à l'hystérésis, nous les considérerons comme sensiblement constants.

Appelons enfin P le poids du train, m sa masse, μ la masse fictive représentant l'effet de la rotation des roues et induits, f le coefficient de traction, i la pente de la voie, F l'effort à la jante ; si l'on néglige la résistance de l'air on a le système d'équations suivant :

$$\mu \frac{dv}{dt} = F - \alpha v - \varphi - fP \quad (1)$$

$$m \frac{dv}{dt} = iP - F \quad (2)$$

Éliminons F entre ces deux équations

$$(m + \mu) \frac{dv}{dt} = (i - f)P - \alpha v - \varphi$$

Pour abrégé, nous désignerons, dans la suite, par $M = m + \mu$ la masse fictive du train.

$$M \frac{dv}{dt} = (i - f)P - \alpha v - \varphi \quad (2')$$

On tire de là :

$$M dv = [(i - f)P - \varphi - \alpha v] dt$$

$$t = \int_{v_0}^v \frac{M dv}{(i - f)P - \varphi - \alpha v} = \frac{-M}{\alpha} \log. \text{ nép. } \left(\frac{(i - f)P - \varphi - \alpha v}{(i - f)P - \varphi - \alpha v_0} \right)$$

(1) Cf. La Traction électrique sur voies ferrées. A. Blondel et P.-F. Dubois. Tome second, page 786. Baudry.

ν_0 étant la vitesse initiale au temps $t=0$. Nous en déduisons :

$$\frac{(i-f)P - \varphi - \alpha\nu}{(i-f)P - \varphi - \alpha\nu_0} = e^{-\frac{\alpha}{M}t}$$

$$\nu = \frac{(i-f)P - \varphi}{\alpha} + \frac{e^{-\frac{\alpha}{M}t}}{\alpha} [\alpha\nu_0 + \varphi - (i-f)P] \quad (3)$$

Plusieurs cas sont à distinguer : (1)

$$1^{\circ} \quad (i-f)P > \varphi \quad \alpha\nu_0 + \varphi > (i-f)P$$

Ces deux termes de (3) sont positifs, et ν décroît de la valeur ν_0 à la valeur suivante ν_m atteinte pour $t = \infty$

$$\nu_m = \frac{(i-f)P - \varphi}{\alpha} \quad (4)$$

On pourra alors admettre qu'après un temps suffisamment long, la vitesse sera uniforme et aura la valeur donnée par (4). Elle est variable avec α et l'on peut, théoriquement tout au moins, la rendre aussi petite que l'on veut par un accroissement de α , c'est-à-dire en diminuant la résistance R du rhéostat (fig. 2) (2).

$$2^{\circ} \quad (i-f)P < \varphi \quad \alpha\nu_0 + \varphi > (i-f)P$$

Il suffit évidemment, pour cela, que la première inégalité ait lieu ; la valeur de ν donnée par (3) peut s'annuler pour un temps fini θ , défini par la relation :

$$0 = (i-f)P - \varphi + e^{-\frac{\alpha\theta}{M}} [\alpha\nu_0 + \varphi - (i-f)P] \quad (5)$$

$$\theta = \frac{-M}{\alpha} \log. \text{ nep.} \left(\frac{(f-i)P + \varphi}{(f-i)P + \varphi + \alpha\nu_0} \right)$$

Ou en mettant le signe positif de θ en évidence :

$$\theta = \frac{M}{\alpha} \log. \text{ nep.} \left(\frac{(f-i)P + \varphi + \alpha\nu_0}{(f-i)P + \varphi} \right) \quad (6)$$

(θ s'annule pour $\alpha = \infty$, malgré l'indétermination apparente de la formule pour cette valeur).

Dans le cas présent, les frottements de toutes espèces $fP + \varphi$ déterminent l'arrêt complet.

$$3^{\circ} \quad (i-f)P > \varphi \quad \alpha\nu_0 + \varphi < (i-f)P$$

La seconde hypothèse renferme la première.

La formule (3) donne alors pour ν des valeurs croissantes avec le temps. La valeur maxima est atteinte pour $t = \infty$

$$\nu_m = \frac{(i-f)P - \varphi}{\alpha}$$

Elle est la même que la valeur minima du premier cas et peut aussi représenter ν après un temps suffisamment long. On conclut donc de ce qui précède que, lorsque $(i-f)P < \varphi$, c'est-à-dire lorsque les frottements peuvent maintenir arrêtée la voiture sur la pente i , il y a arrêt complet, sinon la vitesse tend rapidement vers ν_m , soit par des valeurs décroissantes, soit par des valeurs croissantes, suivant la résistance R du rhéostat. Dans ce dernier cas, le frein peut servir à régler la vitesse sur les rampes et l'on

(1) Nous avons négligé l'effet des courants de Foucault peu importants en général. Nous verrons, d'ailleurs, plus loin la manière d'en tenir compte.

(2) En réalité ce n'est possible qu'avec les moteurs à excitation séparée comme on le verra plus loin.

voit, d'après l'expression de ν_m , que, pour un poids P et une pente i donnés, à chaque valeur du rhéostat R (fig. 2) correspond une vitesse de régime bien déterminée. Cette propriété rend le réglage de vitesse très facile.

Pour établir les formules ci-dessus, nous avons supposé implicitement que F restait toujours inférieur à l'effort adhérent. Cherchons, dans la même hypothèse, le parcours effectué au cas où l'arrêt complet peut être réalisé.

On sait que : $\nu = \frac{dx}{dt}$

En remplaçant ν par sa valeur dans (3) on trouve, pour le parcours e , l'expression :

$$e = \int_0^{\theta} \frac{(i-f)P - \varphi}{\alpha} dt + \frac{\alpha\nu_0 + \varphi - (i-f)P}{\alpha} \int_0^{\theta} e^{-\frac{\alpha}{M}t} dt$$

$$e = \frac{(i-f)P - \varphi}{\alpha} \times \theta + \frac{\alpha\nu_0 + \varphi - (i-f)P}{\alpha} \left[\frac{M}{\alpha} \left(1 - e^{-\frac{\alpha}{M}\theta} \right) \right]$$

Tirons la valeur de θ de (5) et (6) :

$$e = \frac{(i-f)P - \varphi}{\alpha} \times \frac{M}{\alpha} \times \log. \text{ nep.} \left[\frac{(f-i)P + \varphi + \alpha\nu_0}{(f-i)P + \varphi} \right]$$

$$+ \frac{\alpha\nu_0 + \varphi - (i-f)P}{\alpha^2} M + \frac{(i-f)P - \varphi}{\alpha^2} M$$

$$e = \frac{\nu_0 M}{\alpha} + \frac{(i-f)P - \varphi}{\alpha^2} \times M \times \log. \text{ nep.} \left[\frac{(f-i)P + \varphi + \alpha\nu_0}{(f-i)P + \varphi} \right] \quad (7)$$

expression identique à celle trouvée par M. Blondel, par une autre méthode de calcul.

Il convient de remarquer que, pour qu'il y ait arrêt, il faut, comme on l'a vu : $(i-f)P - \varphi < 0$.

Le deuxième terme du second membre de (7) est donc < 0 . Enfin α étant sensiblement inversement proportionnel à ν_0 , pour un effort initial F_0 donné, e est proportionnel au carré de la vitesse, comme pour un frein ordinaire.

Dans les calculs précédents nous avons négligé l'effet de la résistance de l'air. On pourra, en général, en représenter l'effet par une expression de la forme $\delta \nu^2$. Comme cet effet est analogue à celui produit par les courants de Foucault nous examinerons plus en détail son action lors de l'étude des freins à plateaux. Nous ferons seulement remarquer pour l'instant, que la résistance de l'air donne une décroissance rapide à la courbe des vitesses au début du freinage, comme cela est évident *a priori*. Aux très grandes vitesses la courbe prend sensiblement la forme $\gamma \nu - \delta$; on peut alors, par une correction convenable des valeurs de α et φ , revenir au cas ci-dessus.

Nous avons supposé jusqu'ici que α restait constant pendant toute la durée du freinage, même lorsqu'on veut obtenir un arrêt complet. Il est de toute évidence qu'il n'en sera pas ainsi dans ce dernier cas en général, et que le mécanicien réduira la résistance R (fig. 2) à mesure que la vitesse décroîtra (1). Admettons que la self-induction des circuits soit négligeable et que le courant suive rigoureusement les variations instantanées de la résistance R . Chaque fois que

(1) Certains combinateurs ne comportent cependant qu'une touche de freinage électrique.

α prend une nouvelle valeur, la vitesse se met à décroître suivant une nouvelle loi et l'on obtient une succession de courbes dont l'allure théorique générale est donnée par la figure 5.

Chaque courbe est définie par l'état initial v_0, v_1, v_2, \dots , et par les valeurs correspondantes de α (égalité 3). L'accélération négative en un point M est représentée, en valeur absolue, par $\tan \theta$. On voit facilement, d'après la formule 3, qu'elle est maxima au temps $t = 0$ pour $v = v_0$ et qu'elle passe par des valeurs tantôt croissantes, tantôt décroissantes, γ diminuant d'une manière continue à mesure qu' α prend les valeurs croissantes $\alpha_1, \alpha_2, \dots$. Cette variation de l'accélération négative pendant le freinage produit une impression désagréable aux voyageurs et, de plus, augmente considérablement le temps d'arrêt.

Désignons, en effet, par a le coefficient d'adhérence; pour qu'il n'y ait pas patinage l'on doit avoir : $F < aP$.

Or de l'égalité (2) nous tirons, en mettant le signe négatif de $\frac{dv}{dt}$ en évidence :

$$F = iP + m \frac{dv}{dt}$$

Donc :
$$\frac{dv}{dt} < \frac{(a-i)P}{m} = (a-i)g$$

ou
$$\frac{dv}{dt} < \gamma_m, \text{ en posant } \gamma_m = (a-i)g \quad (9)$$

Telle est la valeur maxima absolue γ_m de l'accélération négative pendant le freinage.

Il est évident que l'on obtiendrait le minimum d'arrêt en maintenant $\frac{dv}{dt}$ à une valeur γ légèrement inférieure à γ_m par une manœuvre convenable du rhéostat R. Puisque $\frac{dv}{dt}$ est maxima en M_0 (fig. 5), on pourrait ainsi faire décroître la vitesse suivant $M_0 T_0$ tangente en M_0 et, par suite, réaliser le temps d'arrêt OT_0 au lieu de OA . On obtiendrait de cette manière un arrêt bien plus rapide, puisque l'on a toujours $OT_0 < OA$. Ceci nous amène donc à étudier la méthode suivante à laquelle nous donnerons le nom de freinage à effort constant.

FREINAGE A EFFORT CONSTANT. — L'expression de F devient alors
$$F = iP + m\gamma \quad (10)$$

Par suite, comme γ est constant par hypothèse, F est aussi constant pendant la durée du freinage pour une valeur donnée de i .

Les lois du mouvement uniformément varié nous donnent de plus pour e et θ les valeurs :

$$\theta = \frac{v_0}{\gamma} \quad e = \frac{v_0^2}{2\gamma} \quad (11)$$

D'après l'inégalité (9) on aura d'ailleurs :

$$\theta > \frac{v_0}{(a-i)g} \quad e > \frac{v_0^2}{2(a-i)g} \quad (12)$$

Cherchons maintenant les valeurs de I , l'intensité du courant dans l'induit, et de R en fonction du temps t .

Nous considérerons trois cas :

1^o Moteurs en série. — 2^o Moteurs à excitation séparée. — 3^o Moteurs en dérivation.

1^o MOTEURS EN SÉRIE. — D'après une propriété connue du moteur-série, si l'on néglige les courants de Foucault, l'effort résistant du moteur comprend deux termes, l'un k sensiblement constant (frottements du moteur et des engrenages), l'autre fonction de I seulement (couple dû à l'action du flux inducteur sur I et à l'hystérésis); nous représenterons ce dernier terme par $f(I)$.

En mettant en évidence le signe négatif de γ on obtient ainsi l'expression suivante :

$$F = f(I) + k + fP - \mu\gamma \quad (13)$$

En remplaçant F par sa valeur tirée de l'égalité (10) il vient :

$$f(I) = (i-f)P - k + M\gamma \quad (13')$$

Pour une pente i donnée, $f(I)$ et par suite I sont donc constants.

Désignons par e la force électromotrice du moteur marchant en génératrice, r la résistance du moteur, R celle variable du rhéostat; d'après la loi d'Ohm l'on a :

$$e = (R + r)I \quad (14)$$

$$R = \frac{e}{I} - r \quad (15)$$

Puisqu'il s'agit d'un moteur-série et que I est constant, e est proportionnel à la vitesse v ; R doit donc varier suivant une loi linéaire avec cette vitesse v qui, elle-même, décroît linéairement avec le temps t , puisque γ est constant. Sur la figure 6, OM_0 représente v_0 la vitesse initiale, OA est le temps d'arrêt θ donné par les formules (11). Si l'on joint M_0A , d'après ce que l'on vient de voir MH est la vitesse au temps HO . De même, d'après (14) MH peut aussi représenter la résistance $(R + r)$ correspondante et si l'on porte à cette échelle $GH = G_0O = NK = r$ la longueur MG mesure R .

Ainsi, dans le cas où la résistance R variera aussi linéairement avec le déplacement de la manivelle du rhéostat, le mécanicien devra tourner cette manivelle d'un mouvement uniforme pour réaliser le freinage à effort constant.

Remarque. — D'après la figure 6, pour que γ fût constant pendant toute la durée du freinage, il faudrait que, pour $V = 0$, $R + r = 0$, puisque ces deux quantités sont proportionnelles à MH ; ceci est évidemment impossible, puisque l'on a toujours $r = NK > 0$. Donc, lorsque le rhéostat sera mis en court circuit ($R = 0$) la vitesse décroîtra suivant la courbe NA' au lieu de la droite NA . NA' sera une courbe analogue à celles de la figure 5 et, de plus, cette décroissance finale de γ amortira beaucoup les chocs qui auraient lieu si l'arrêt s'effectuait suivant NA , par suite de la discontinuité de l'accélération au point A . D'ailleurs, la durée de l'arrêt sera en général peu augmentée, car r est faible.

Formule pratique. — L'équation (13) peut se ramener à la forme suivante, plus commode en général pour les calculs

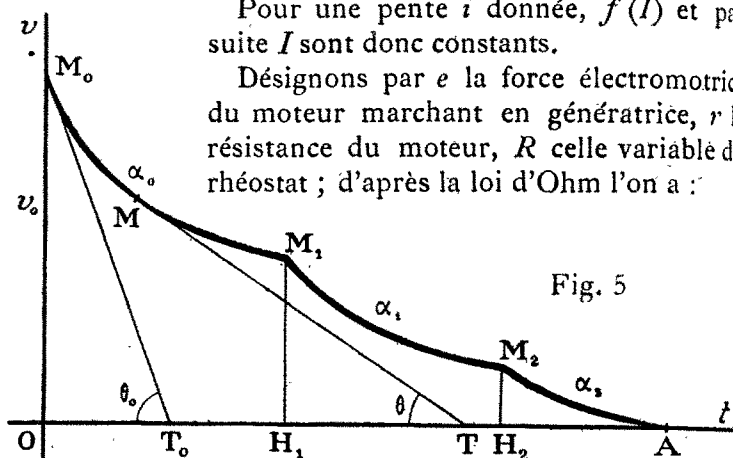


Fig. 5

pratiques. Considérons le quotient suivant où n désigne le nombre de moteurs :

$$\eta = \frac{neI}{\nu(f(I) + k)} \quad (16)$$

C'est le rapport de la puissance électrique totale neI à la puissance mécanique $(f(I) + k)\nu$ disponible sur les essieux de la voiture. Il sera facile de le déterminer expérimentalement ou de l'évaluer approximativement d'après des courbes relevées sur le moteur marchant en génératrice.

D'après ce que l'on vient de voir, lorsqu'on freine à effort constant, $\frac{\nu}{e}$ et I sont constants; η l'est donc également pendant toute la durée du freinage.

Tirons la valeur de $f(I) + k$ de (16) et portons-la dans (13'), nous obtenons ainsi l'équation 17 dont les applications sont très faciles :

$$f(I) + k = \frac{neI}{\eta\nu}$$

$$neI = \eta\nu [M\gamma + (i - f)P] \quad (17)$$

Réalisation du freinage à effort constant. — Comme on vient de le voir, l'hypothèse du freinage à effort constant introduit de plus une grande simplicité dans les formules. En pratique, deux difficultés s'opposent à sa réalisation parfaite :

- 1° Le nombre de plots restreints des rhéostats métalliques ordinairement employés;
- 2° Les conditions mêmes de l'exploitation, lorsqu'il s'agit d'un tramway. La diversité des arrêts et la surveillance active de la voie, ne permettent alors pas toujours au mécanicien de réaliser le freinage à effort constant.

Cependant on devra chercher à s'en rapprocher le plus possible, car on peut ainsi obtenir un arrêt au moins aussi rapide qu'avec n'importe quel frein mécanique, tout en supprimant le patinage dans le cas d'une manœuvre trop brusque. Enfin, même lorsque sa réalisation est aléatoire, l'étude de cette méthode est intéressante, car elle détermine très simplement les conditions d'arrêt les plus favorables que l'on puisse obtenir avec un matériel donné.

Exemple Pratique. — A titre d'exemple, nous allons faire l'application des formules ci-dessus à un exemple tiré du livre bien connu « *Constructions Electromécaniques* » de Gisbert Kapp (1). Il s'agit d'une voiture de 8 tonnes, à chargement complet équipée avec deux moteurs d'ERlikon pouvant supporter jusqu'à 25 ampères sous 500 volts.

La fig. 7 représente la caractéristique à vide de l'un de ces moteurs marchant en génératrice à 450 tours par minute.

Supposons donc que nous voulions réaliser l'arrêt en palier, la voiture étant lancée à une vitesse ν_0 de 9 mètres à la seconde. L'intensité du courant pendant le freinage devra, en outre, être maintenue à la valeur maxima admissible, 25 ampères. De l'égalité (17), on tire :

$$\frac{neI}{\eta\nu} = M\gamma + (i - f)P$$

$$\gamma = \frac{e}{\nu} \times \frac{nI}{\eta M} + (f - i) \frac{M}{P} \quad (18)$$

Dans cette dernière équation le quotient $\frac{e}{\nu}$ mis en évidence est constant, d'après ce qui a été dit plus haut. Cherchons sa valeur en remarquant que d'après la caractéristique, pour une intensité de 25 ampères, e a une valeur de 490 volts à 450 tours par minute, c'est-à-dire la voiture marchant à une allure de 3,75 mètres à la seconde.

On obtient donc :

$$\frac{e}{\nu} = \frac{490}{3,75} = 130,67$$

D'après les données, l'on a de plus : $P = 8000$ kilôs,

$$i = 0, \quad f = \frac{15}{1000} \text{ (15 kilôs par tonne)} \quad n = 2,$$

$$I = 25 \text{ ampères.}$$

Enfin, nous supposons que $\eta = 0,80$ (choix justifié plus loin) et nous majorerons de 30 pour 100 la masse réelle pour tenir compte du mouvement de rotation des moteurs :

$$M = \left(1 + \frac{30}{100}\right) \frac{P}{g} = \frac{10400}{g} \text{ kil. masse.}$$

Remplaçons les lettres par leurs valeurs dans (18); en remarquant que les unités choisies sont le mètre et le kilogramme et en divisant par suite le produit eI exprimé en watts par $g = 9,81$, il viendra :

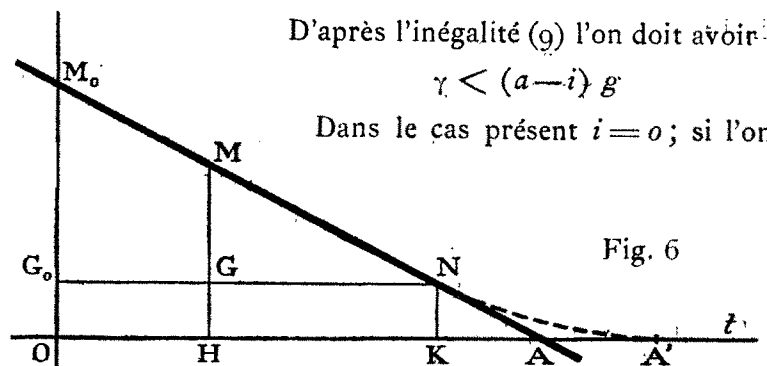
$$\gamma = \frac{130,67 \times \frac{25 \times 2}{g}}{0,80 \times \frac{10400}{g}} + \frac{15}{1000} \times \frac{100}{130} \times 9,81$$

$$= \frac{6533,5}{8320} + \frac{147,5}{1300} = 0,780 + 0,113 = 0,893 \text{ m. par seconde.}$$

D'après l'inégalité (9) l'on doit avoir :

$$\gamma < (a - i)g$$

Dans le cas présent $i = 0$; si l'on



prend pour a la valeur moyenne 0,10, l'inégalité précédente devient :

$$\gamma < 0,10 \times 9,81 \quad \gamma < 0,981 \text{ mètre par seconde.}$$

La valeur trouvée pour γ est donc parfaitement admissible. Cherchons maintenant la valeur initiale R_0 de la résistance, les moteurs alimentant chacun séparément une résistance R .

La formule (15) donne alors, en appelant e_0 la tension initiale à la vitesse ν_0 :

$$R_0 = \frac{e_0}{I} - r$$

Pour calculer e_0 il suffit de se rappeler que pour un courant I constant, les forces électromotrices sont proportionnelles aux vitesses. D'après la caractéristique, à un

(1) GIBBERT KAPP, *Constructions Electromécaniques*. — Traduit de l'allemand par O. DUBSKY et P. GIRAULT, page 89, planche VI, Baudry.

courant de 25 ampères correspond une force électromotrice de 490 volts, la vitesse de la voiture étant de 3,75 mètres par seconde. Pour un même courant et une vitesse v_0 de 9 mètres à la seconde, la tension e_0 satisfera à la relation :

$$\frac{490}{e_0} = \frac{3,75}{9} \quad e_0 = 1203 \text{ volts}$$

En remplaçant e_0 et r par leurs valeurs dans l'expression ci-dessus, on trouve :

$$R_0 = \frac{1203}{25} - 3 = 45 \text{ ohms en chiffres ronds.}$$

Enfin, on obtiendra la durée de l'arrêt θ et l'espace parcouru par les formules (11) :

$$\theta = \frac{v_0}{\gamma} = \frac{9}{0,893} = 10,08 \text{ secondes.}$$

$$e = \frac{v_0^2}{2\gamma} = \frac{81}{1,786} = 45,35 \text{ mètres.}$$

En réalité, comme nous l'avons vu plus haut, ces valeurs de θ et e sont des limites inférieures. En effet, par suite de la résistance du moteur r , la vitesse décroît suivant $M_0 NA'$ au lieu de $M_0 NA$ (fig. 6) et le temps d'arrêt réel OA' est toujours $> OA$ temps calculé. Il est facile de calculer la vitesse v_1 en N (fig. 6) au temps OK ou le rhéostat R est mis en court circuit.

L'on a, en effet, en désignant par e_1 la force électromotrice en N :

$$I = \frac{e_0}{R_0 + r} = \frac{e_1}{r} \quad \text{et} \quad \frac{v_0}{v_1} = \frac{e_0}{e_1}$$

Donc finalement : $v_1 = v_0 \frac{r}{R_0 + r}$

En remplaçant les lettres par leurs valeurs, l'on obtient ainsi :

$$v_1 = 9 \times \frac{3}{45 + 3} = \frac{9}{16} = 0,5625 \text{ mètre à la seconde.}$$

ce qui correspond à une vitesse de 2 kilomètres à l'heure. A cause de cette très faible valeur de v_1 , OA' ne doit guère surpasser OA et l'effet de la résistance du moteur se traduit surtout par une diminution progressive très favorable de l'accélération vers la fin de l'arrêt.

Les quantités R_0 θ étant ainsi déterminées, on pourra tracer la ligne M_0A et par suite connaître R et v à chaque instant.

Les divers calculs ne présentent aucune difficulté, et nous ne nous y arrêterons pas davantage, croyant avoir suffisamment montré par cet exemple l'extrême simplicité des formules.

Influence du coefficient η . — D'après ce que nous avons vu, ce coefficient désigne le rapport de la puissance électrique totale à la puissance disponible sur l'essieu, la vitesse étant supposée uniforme. Il exerce une grande influence sur la valeur γ de l'accélération comme on le voit par la formule (18), d'après laquelle γ est inversement proportionnelle à η .

Ceci est d'ailleurs évident, puisque ce coefficient η diminue avec les frottements du moteur, des engrenages et les pertes par hystérésis, et il faudra, par sécurité, compter sur

une valeur un peu élevée de η . On pourra déterminer expérimentalement, avec précision, cette valeur, en faisant tourner le moteur en génératrice, après l'avoir mis en court circuit sur lui-même, et en lui communiquant le mouvement par l'intermédiaire des engrenages et de l'essieu. On règle la vitesse de manière à ce qu'il passe le courant I pour lequel on veut connaître η (1).

Si l'on mesure alors la puissance mécanique W absorbée sur l'axe des roues, l'on obtient η par la relation :

$$\eta = \frac{r I^2}{W}$$

La résistance r étant faible, il suffira, pour cet essai, d'une puissance bien inférieure à la puissance réelle du moteur soumis à l'essai. Dans l'exemple précédent, nous avons adopté la valeur 0,80 qui semble être convenable pour les tramways ; pour les chemins de fer, surtout pour les lignes où l'on emploie des moteurs sans réduction, on devra prendre pour η des valeurs comprises entre 0,90 et 0,95.

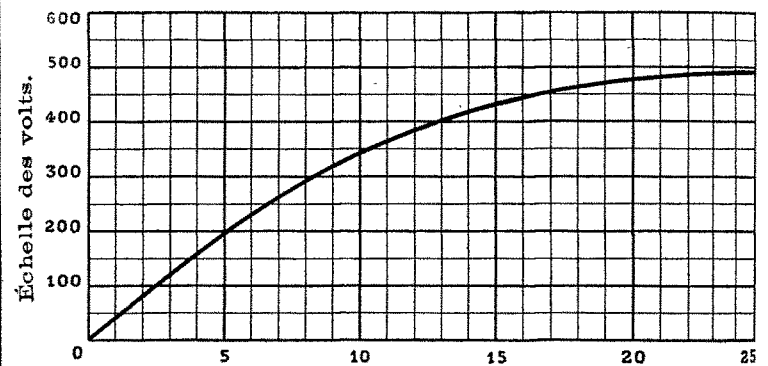


Fig. 7. — Échelle des ampères.

2° MOTEURS A EXCITATION SÉPARÉE. — Le moteur à excitation séparée peut être considéré comme un cas particulier du moteur en série pour lequel la fonction $f(I)$ de la formule (13) prend une forme linéaire. Ce que nous avons dit du moteur-série s'applique donc également, et nous ne nous arrêterons pas davantage à ce cas, d'ailleurs assez peu courant en pratique.

3° MOTEURS EN DÉRIVATION. — Désignons par I le courant dans l'induit ; i le courant dans l'inducteur ; R la résistance du circuit extérieur ; ρ la résistance de l'inducteur ; r celle de l'induit.

La force électromotrice e peut se mettre sous la forme :

$$e = \omega f(i)$$

ω étant la vitesse angulaire du moteur, et $f(i)$ étant une fonction de i dont les valeurs sont proportionnelles au flux inducteur.

La seconde loi de Kirchoff nous donne :

$$\omega f(i) = Ir + (I - i) R$$

$$(I - i) R = i \rho$$

d'où, en éliminant i :

$$\omega f\left(\frac{RI}{R + \rho}\right) = I \left(r + \frac{R\rho}{R + \rho}\right) \quad (19)$$

(1) Le coefficient η ne dépend, comme on l'a vu par la formule (16), que de l'intensité I admise pendant la durée du freinage.

Désignons, de plus, par α et β deux constantes et posons :

$$\left. \begin{aligned} \alpha R &= R + \rho \\ \beta \omega &= r + \frac{R\rho}{R + \rho} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

L'égalité (19) devient alors :

$$\omega f\left(\frac{I}{\alpha}\right) = \beta \omega I$$

ou si $\omega \leq 0 \quad f\left(\frac{I}{\alpha}\right) = \beta$

Le courant I est alors constant quelle que soit la vitesse ; par suite, le courant d'excitation $i = \frac{I}{\alpha}$ est constant également, ainsi que le couple résistant du moteur qui n'est fonction que de I et i . On réalise donc un freinage à effort constant avec les moteurs en dérivation, si l'on fait varier les résistances R et ρ d'après les lois linéaires suivantes, tirées des équations (20) :

$$\rho = \alpha(\beta \omega - r)$$

$$R = \frac{\alpha}{\alpha - 1}(\beta \omega - r)$$

D'ailleurs, l'effort de freinage étant constant, la vitesse ω décroît avec le temps suivant une loi linéaire et, par conséquent, ρ et R sont également des fonctions décroissantes linéaires du temps.

Enfin, les expressions de R et ρ montrent qu'il existe, comme pour le moteur-série, une vitesse limite au-dessous de laquelle le freinage à effort constant n'est plus possible ; ρ ne peut, en effet, descendre au-dessous de la valeur $\rho = 0$ de la résistance propre de l'inducteur et, par suite, l'on doit avoir :

$$\rho_0 \leq \alpha(\beta \omega - r)$$

d'où :

$$\omega \geq \frac{\rho_0 + \alpha r}{\alpha \beta}$$

Cette restriction faite, on opérera, pour les calculs pratiques, de la même façon que précédemment ; ceci nous dispensera de revenir sur ce sujet, le freinage électrique des moteurs en dérivation étant d'ailleurs peu employé, à cause de la facilité avec laquelle ils se désamorcent.

(A suivre).

J. BÉTHENOD,
Ingénieur E. C. L.

LE MAL DES MONTAGNES (1)

Le Conseil Fédéral Suisse, avant d'accorder la concession concernant le chemin de fer de la Jungfrau, chargea M. Kronecker, en 1899, d'une expertise physiologique ayant pour but de déterminer si les circonstances spéciales d'un chemin de fer établi dans ces conditions ne sauraient être préjudiciables, tant aux employés et ouvriers, qu'aux voyageurs. C'était demander une étude approfondie de la maladie connue sous le nom de *mal des montagnes*, afin de déterminer les conditions qui en font naître ou en atténuent les symptômes.

(1) Extrait d'une note de M. KRONECKER, présentée par M. MAREY à l'Académie des Sciences, dans sa séance du 28 décembre 1903.

En fait de documents précis sur cette question, on ne possédait guère que les beaux travaux de Paul Bert sur les effets de la pression barométrique, et les observations faites par M. Chauveau sur les changements de la circulation du sang, étudiés au moyen du sphygmographe, dans une ascension au sommet du Mont Blanc. M. Kronecker, en instituant de nouvelles expériences, s'adjoignit plusieurs de ses élèves et divers physiologistes à titre de collaborateurs. Nous allons énumérer les principaux résultats obtenus dans une série d'expériences faites à diverses altitudes

Pour étudier l'influence de l'altitude seule, on prit six personnes d'âges et de sexes différents, auxquelles on épargna tout effort musculaire, en les faisant porter de Zermatt (1600^m) jusqu'au plateau de Breithorn (3750^m). A cette altitude, elles avaient les lèvres nettement cyanosées, un peu de diminution d'appétit et de la répulsion pour le vin ; mais tout effort musculaire leur était pénible : 20 pas de marche les essouffaient ; les moindres efforts, comme le maniement de quelques instruments, ne pouvaient se faire qu'avec des intervalles de repos.

Au point de vue de l'exhalation de CO² pendant le repos, elle fut la même à la faible altitude de Brienz que sur le Gornergrat (3300^m) ; mais dans les ascensions de montagnes, cette exhalation s'éleva beaucoup au dessus de la proportion normale : elle dépassait 9, 11 et même 12 pour 100. M. Jackson note dans un passage pénible sur le Scheideck une élimination particulière de l'Azote par les urines. On vit, sur des sujets placés dans des chambres pneumatiques, se reproduire un certain nombre de phénomènes énumérés ci-dessus et toujours on observa que les accidents étaient au minimum sur les sujets entraînés aux courses de montagnes.

Des lapins qu'on fit respirer par un tube trachéal communiquant avec l'intérieur d'un gazomètre plein d'air furent rapidement asphyxiés lorsque l'air qu'ils respiraient avait une pression de 20 à 30 millimètres au dessous de l'air ambiant.

Pour M. Kronecker, les effets du mal des montagnes tiennent à l'action mécanique de la moindre pression atmosphérique. Le mécanisme des accidents tient à la stagnation du sang dans le poumon, la pression du sang étant très faible dans les vaisseaux de cet organe, un faible changement dans la pression de l'air inspiré peut produire des perturbations considérables dans le cours du sang. Deux méthodes peuvent atténuer ces troubles : l'une purement mécanique, l'excitation forcée est analogue à l'expérience de Valsalva ; la seconde, agissant sur le système nerveux, provoque des contractions réflexes au moyen d'excitations périphériques de la peau.

Note sur la Distribution de la Lumière et de la Force électrique

A GRENOBLE

Origines de la question. — Après de longues et patientes études préliminaires le Conseil municipal de Grenoble décidait, le 30 décembre 1901, que l'entreprise de la distribution de l'énergie électrique pour l'éclairage et les besoins industriels sur le territoire de cette commune, serait exploitée directement par la ville.

Ultérieurement, M. Capitant, conseiller municipal et professeur à la Faculté de Droit de l'Université de Grenoble, dans un très remarquable rapport sur les voies et moyens à suivre pour réaliser cette décision, proposait à la Ville de traiter avec la Société électro-chimique de la Romanche et lui indiquait sur quelles bases il convenait de le faire.

En particulier, il l'engageait à payer l'énergie au compteur, suivant un tarif équitable et dégressif avec l'accroissement de la consommation, pour la revendre aux particuliers dans