

3. *Puissance à la jante des roues motrices.* — Elle correspond à la puissance au frein d'une machine fixe et comprend tout le rendement de la locomotive considérée comme machine effectuant un travail. Par contre, elle ne comprend pas la résistance de la locomotive comme véhicule; en d'autres termes, elle ne permettrait pas d'apprécier les qualités qu'une locomotive pourrait avoir au point de vue d'une faible résistance des fusées ou d'un profil aérodynamique. Mais ce sont là des questions de bonne

conception de l'ensemble du train, surtout en ce qui concerne la forme aérodynamique, et il est logique d'en tenir compte dans la résistance du train et non dans le rendement de la locomotive. Sur un banc d'essais de locomotives, c'est cette puissance qui est mesurée, plus, toutefois, le frottement des fusées des essieux-moteurs quand ils tournent. Dans les essais de route, il n'y a pas de méthode directe pour mesurer cette puissance.

L'équation du mouvement d'un train peut s'écrire comme suit :

$$F = \left[ \frac{P + Q}{g} + \Sigma \frac{I}{R^2} \right] \frac{dv}{dt} + P(w_p + i) + Q(w_q + i)$$

en omettant le terme relatif aux oscillations élastiques du train, qui est négligeable.  $F$  est l'effort exercé à la jante des roues motrices de la locomotive et produisant le mouvement;  $P$  et  $Q$  sont les poids de la locomotive et du train, respectivement, et  $w_p$  et  $w_q$  leurs résistances respectives à l'avancement sur la voie;  $dv/dt$  est l'accélération du train,  $g$  l'accélération due à la gravité, et  $i$  est la résistance due à la déclivité.  $\Sigma I/R^2$  est le terme représentant l'inertie totale des roues en rotation,  $I$  étant le moment d'inertie et  $R$  le rayon des roues individuelles.

Si maintenant, au lieu de l'effort à la jante des roues motrices, on mesure l'effort au crochet d'attelage, il faut supprimer les termes comprenant le poids  $P$  de la locomotive et il est évident, qu'à moins de connaître la déclivité et l'accélération du train au moment voulu, ainsi que la résistance de la locomotive comme véhicule, il est impossible de déterminer le travail de la locomotive, exprimé par la vitesse du train et le poids des voitures ou wagons remorqués, en fonction des caractéristiques fournies par les dimensions. Si la déclivité et la puissance indiquée sont données, comme dans les tableaux de W. M. Smith, il est essentiel en outre de connaître l'accélération du train et les frottements internes du mécanisme de la locomotive.

**La méthode d'essais belge.** — Nous avons déjà parlé des recherches effectuées par Desdouits avec le pendule dynamométrique ou dynamomètre d'inertie. C'est au début des années 80 du siècle dernier que Desdouits commença à s'intéresser à l'appareil, alors nouvellement inventé, qui est généralement connu en Angleterre sous le nom d'« ergomètre d'inertie » et au cours des vingt années suivantes, il publia les comptes rendus de nombreuses investigations effectuées à l'aide de cet appareil et qui comprenaient des mesures de la résistance des locomotives (27). Le pendule dynamométrique est suspendu dans le wagon-dynamomètre et fait avec sa position normale un angle proportionnel à la force accélératrice agissant sur le train dans le sens de la marche, *indépendamment* de la déclivité (28). Un mécanisme enregistreur fait décrire au pen-

(27) Nadal donne une liste de références aux mémoires de Desdouits, *Revue Générale des Chemins de fer*, 1903, vol. 26, p. 285.

(28) Sur une déclivité, le déplacement du pendule par rapport à sa position normale sous la force statique de la gravité, est exactement compensé par la composante de l'accélération, dans le sens de la marche, de la force de gravité dynamique. Ainsi, si le train gravit une rampe à une vitesse uniforme, l'ergomètre enregistre une force accélératrice égale et opposée à cette composante dynamique et qui est due à l'effort de traction de la locomotive.

dule une courbe dont les ordonnées, dans la forme primitive employée par Desdouts, étaient proportionnelles à la force accélératrice. Dans les formes ultérieures de l'ergomètre, le mécanisme est disposé de manière que la pente de la ligne tracée par le stylet est proportionnelle à la force accélératrice.

On obtient ainsi la somme de tous les termes du second membre de l'équation du mouvement du train, à l'exception de ceux exprimant les résistances de la locomotive et du train et l'inertie des roues tournantes. Si, immédiatement après avoir fait ces mesures pour une vitesse particulière quelconque, et avant que les conditions aient eu le temps de se modifier, on ferme le régulateur, le nouveau taux d'accélération, qui sera ordinairement négatif, donnera la résistance totale du train. Ainsi l'équation du mouvement du train peut être complètement résolue et l'effort de traction de la locomotive à la jante des roues motrices déterminé, si l'on néglige l'inertie des roues tournantes.

Bien plus tard, Doyen, ingénieur en chef aux Chemins de fer de l'Etat belge, adopta les propositions de Desdouts (29) et les développa systématiquement pour établir ce qu'on appelle la méthode belge d'essai. Les essais furent effectués dans les conditions variables d'un parcours ordinaire, le régulateur étant fermé pendant environ un kilomètre à un certain nombre de vitesses différentes, de façon

273 kgr. par m <sup>2</sup> de grille par heure	aux vitesses <	40 km. à l'heure.
317 » » »	» <	60 »
410 » » »	» <	80 »
521 » » »	» <	100 »
590 » » »	» <	120 »

L'effort à la jante des roues motrices correspondant à chacune de ces vitesses fut calculé à l'aide d'une valeur constante pour la consommation de combus-

à permettre de calculer le travail de la vapeur à la jante des roues motrices. Les données relatives au travail de la locomotive basées sur ce chiffre sont exactement comparables pour différentes locomotives (30) et c'est là le grand avantage que la méthode d'essai belge présentait sur la méthode ordinaire, consistant à n'intégrer que la puissance développée au crochet d'attelage. Cependant le degré d'exactitude susceptible d'être atteint n'est pas très élevé. En premier lieu, les mesures faites à l'aide de l'ergomètre ne sont pas très sûres. Une autre objection est qu'il faut nécessairement mesurer la résistance totale du train quand le régulateur est fermé, alors qu'on désire connaître la résistance qui se produit lorsque la locomotive marche à régulateur ouvert. Enfin, l'inaptitude de la méthode à mesurer les forces dues à l'inertie des masses tournantes constitue une inexactitude d'importance majeure.

On peut aisément obtenir la résistance au roulement de la locomotive et du tender en retranchant de la résistance totale du train, mesurée par l'ergomètre, la résistance des voitures ou wagons mesurée par le dynamomètre au crochet d'attelage du tender. La forme de la courbe caractéristique pour une locomotive, utilisée par Doyen, consistait en une courbe des efforts au crochet basée sur des taux normaux de consommation de combustible par mètre carré de surface de grille (fig. 4). Ces taux normaux étaient les suivants :

tible de la locomotive par cheval-heure, mesuré à la jante des roues motrices, et déterminé d'après les résultats d'essais. La résistance au roulement de la loco-

(29) *Bulletin du Congrès des Chemins de fer*, décembre 1910, p. 4031.

(30) Sauf que des conditions qui diffèrent

notamment entre elles peuvent reporter l'ensemble du travail des locomotives comparées dans différentes régions de rendement.

motive et du tender fut tracée sur le même diagramme, et les longueurs des ordonnées comprises entre les deux courbes indiquent l'effort disponible au crochet d'attelage. On refit les tracés en appliquant un coefficient d'adhérence 6.5 comme limite aux faibles vitesses.

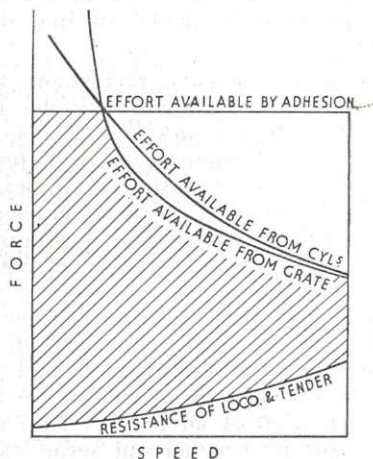


Fig. 4. — Courbes caractéristiques de Doyen.

*Explication des termes anglais :*

Effort available by adhesion = effort utilisable par l'adhérence — Effort available from cyls = effort fourni par les cylindres. — Effort available from grate = effort fourni par la grille.

Cette manière d'obtenir une courbe de l'effort au crochet peut paraître à première vue assez compliquée, mais il ne faut pas oublier que la consommation de combustible par cheval-heure au crochet, déterminée à l'aide de l'intégrateur dynamométrique, ne peut pas être convenablement employée comme base absolue de comparaison, puisqu'elle dépend du poids du train et du profil de la ligne. Ce fait, qui est parfois reconnu insuffisamment, ne saurait être souligné avec trop de force, tout élémentaire qu'il est. En réalité, la courbe belge des efforts est équivalente à l'« effort au crochet corrigé » allemand actuel, c'est-à-dire l'effort au crochet sur une voie exactement en palier.

La méthode d'essais belge n'a cependant jamais eu beaucoup de succès. Elle posait mal le problème principal, c'est-à-dire elle s'attaquait à la tâche impossible de tenir compte des conditions qui varient dans un parcours d'essai, au lieu de stabiliser ces conditions et d'éliminer ainsi un tissu extrêmement complexe de causes et d'effets.

**Essais français à l'indicateur.** — Dans les recherches expérimentales françaises plus récentes, le diagramme d'indicateur fut pris comme principale base de l'étude du travail des locomotives. En 1903, Nadal, ingénieur aux Chemins de fer de l'Etat français, commença la publication des résultats d'une série d'essais de locomotives <sup>(31)</sup>, qui comprenaient des courbes de puissance indiquée en fonction de la vitesse, pour diverses conditions d'admission et de pression dans la boîte à vapeur. Mais en fait ces courbes étaient hypothétiques pour une large part. La conséquence inévitable des conditions variables dans lesquelles les locomotives fonctionnaient fut que les puissances indiquées portées sur les graphiques étaient irrégulières; de plus, l'extrapolation était employée trop librement. C'est pour cette dernière raison que dans certains cas les courbes accusent une très grande puissance indiquée aux vitesses élevées. Nadal reconnaissait que les régions supérieures de quelques-uns de ces groupes de courbes étaient situées en dehors des limites de possibilité. Il mentionne la limite de production de la chaudière, mais obtenait en réalité une courbe pratique du travail par le moyen assez arbitraire consistant à relier entre eux des points correspondant à la pression décroissante dans la boîte à vapeur pour une vitesse croissante, obtenus avec une ouverture constante, mais restreinte, du régulateur. Nadal effectua aussi des mesures de la résistance des locomotives

(31) *Revue Générale des Chemins de fer*, 1903, vol. 26, p. 285.

par la méthode consistant à descendre une pente.

Les travaux de Nadal sont un excellent exemple des limitations inévitables tracées aux enseignements qu'on peut tirer des circonstances fortuites d'un essai de route dans les conditions ordinaires du service, même quand les effets de l'accélération, du profil de la ligne et de la résistance des locomotives sont éliminés en basant les déductions sur la puissance indiquée.

**Les essais autrichiens de Sanzin.** — En Allemagne, la recherche d'une formule simple pour la puissance fut abandonnée pour un travail expérimental plus intensif, exécuté principalement sous l'impulsion du Dr. Rudolph Sanzin, des Chemins de fer autrichiens, dont les expériences reçurent une large publicité en Allemagne. Le Dr. Sanzin fit une étude spéciale de l'effort de traction des locomotives en utilisant l'équation du mouvement d'un train. Il procéda aussi, comme Nadal, à de nombreuses mesures de la résistance des locomotives par la méthode de parcours de la locomotive sur une pente sous l'action de la gravité<sup>(32)</sup> et il proposa et utilisa la même méthode pour déterminer la résistance due à l'accélération angulaire des roues tournantes<sup>(33)</sup>. Il fit remarquer que dans ce but il suffit de faire deux essais de marche à la même vitesse sur des déclivités différentes. Il résulte alors de l'équation du mouvement (page 551) que :

$$\begin{aligned} -w_p P &= \left[ \frac{P}{g} + \Sigma \frac{I}{R^2} \right] \frac{dv_1}{dt} + i_1 P \\ &= \left[ \frac{P}{g} + \Sigma \frac{I}{R^2} \right] \frac{dv_2}{dt} + i_2 P \end{aligned}$$

où  $dv_1/dt$  et  $dv_2/dt$ ,  $i_1$  et  $i_2$  sont les accélérations et déclivités respectives. En

égalant les deux seconds membres, on a

$$\Sigma \frac{I}{R^2} = \left[ \frac{i_2 - i_1}{\frac{dv_1}{dt} - \frac{dv_2}{dt}} - \frac{1}{g} \right] P$$

On peut utiliser la même déclivité si, dans le second cas, la locomotive ou le train remonte la pente au lieu de la descendre.

Sanzin n'a jamais réellement tenté dans ses essais sur le travail des locomotives d'obtenir des conditions constantes, mais il connaissait parfaitement les sources de confusion et d'inexactitude inhérentes aux essais effectués dans des conditions variables. Il introduisit la notion de l'« effort au crochet équivalent » qui est encore employée aujourd'hui comme base des courbes caractéristiques du travail dans la méthode moderne allemande d'essais et la prit pour base de ses courbes de l'effort de traction<sup>(34)</sup>. L'effort au crochet équivalent est l'effort au crochet qui serait exercé par une puissance donnée développée à vitesse constante sur une voie en palier. Mais tandis que l'on se rapproche effectivement de ces conditions dans les essais de route allemands récents, Sanzin dut calculer l'effort au crochet équivalent à l'aide des résultats obtenus dans des conditions irrégulières sur une ligne accidentée. A cet effet, il employa l'équation du mouvement d'un train sous la forme :

$$F_e = F_a + Q(\pm i \pm b) + (L + T)(\pm i \pm b)$$

où  $F_e$  est l'effort au crochet équivalent sur une voie en palier à vitesse constante,  $F_a$  l'effort au crochet observé réel, ou résistance du train,  $Q$  le poids du train,  $L$  et  $T$  les poids respectifs de la locomotive et du tender,  $i$  la résistance de la déclivité par unité de poids et  $b$  la force accélératrice ou retardatrice par unité de poids. Pour le calcul de la

<sup>(32)</sup> Z. V. D. I., 1911, p. 1461.

<sup>(33)</sup> *Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen*, 1919, p. 81 à 87.

<sup>(34)</sup> Z. V. D. I., 1906, vol. 50, p. 118.