

BULLETIN DE L'ASSOCIATION DU CONGRÈS INTERNATIONAL DES CHEMINS DE FER

[621 .151.5]

MÉTHODE BELGE D'ESSAI DE LA LOCOMOTIVE EN ROUTE,

Par JOSEPH DOYEN,

INGÉNIEUR PRINCIPAL DES CHEMINS DE FER DE L'ÉTAT BELGE.

Fig. 1 à 15, p. 4033 à 4047.

La puissance d'une locomotive dépend de plusieurs facteurs, qui sont :

- 1^o Le moteur proprement dit (appareil de distribution, cylindres, etc.);
- 2^o Le générateur de vapeur (grille, surface de chauffe, timbre de la chaudière);
- 3^o L'adhérence;
- 4^o La résistance de la machine au roulement.

La valeur d'une locomotive résulte directement de l'harmonie existant entre ces différents éléments : il importe donc de déterminer, par des mesures exactes, quel est l'effet utile ou l'influence nuisible de chacun d'eux.

En Amérique, le « Pennsylvania Railroad », suivant la voie tracée par l'Université de Purdue (Indiana), a créé de puissantes installations qui permettent d'analyser, sur place, les phénomènes relatifs au rendement d'une locomotive.

La machine soumise à l'essai est placée sur un système de rouleaux dont les axes sont exactement dans la verticale des axes

de ses essieux. Elle est maintenue dans cet état d'équilibre instable par un attelage élastique très ingénieux, qui mesure la tendance à l'avancement tout en empêchant un déplacement qui compromettait l'équilibre. La résistance au roulement, qui, en cours de route, résulte de la résistance propre du moteur et de celle du train remorqué, est créée dans cette machine par un frein hydraulique agissant sur les rouleaux porteurs : par le fait de cette action, ceux-ci opposent à la rotation des essieux moteurs une résistance analogue à la réaction du rail. Un compteur de tours donne à chaque instant la vitesse que prendrait la locomotive si elle roulait sur une voie ordinaire. On conçoit combien il est commode, dans ces conditions, de faire certaines expériences qu'il serait très difficile et souvent même impossible de réaliser en cours de route. Tels sont, par exemple, le relevé du travail indiqué, la mesure des quantités de charbon que l'on peut brûler par mètre carré de grille et par heure, ainsi que les consommations de

vapeur, aux différentes vitesses et pour des positions données des organes de la distribution.

Cette faculté est précieuse, et nous aurons l'occasion de signaler plus loin certains points faibles de notre méthode pour lesquels l'intervention des appareils de Purdue serait très désirable.

Mais la méthode américaine a le défaut de placer la locomotive dans des conditions factices, et le défaut plus grave d'être impuissante à étudier deux des éléments importants cités plus haut : l'adhérence et la résistance au roulement de la machine.

La méthode belge, qui fait l'objet de cet exposé, au rebours de la méthode américaine, prend la locomotive *en route*, c'est-à-dire dans les conditions de la pratique journalière, puisqu'en règle générale nos essais portent sur les trains du service public. Cette méthode est basée sur l'emploi de l'ergomètre d'inertie (1) dont nous rappellerons, en quelques mots, le fonctionnement.

* * *

L'ergomètre (fig. 1) se compose d'un cylindre creux D, relié à un axe de section triangulaire par deux systèmes de trois petits galets à gorge qui lui permettent de se déplacer très librement le long de cet axe en entraînant avec lui la plume K. Cette plume inscrit sur le papier du wagon-dynamomètre le diagramme dont il sera question plus loin.

Le cylindre reçoit un mouvement de rotation par l'intermédiaire de son axe et des roues dentées E reliées à l'essieu du

(1) Voir *Bulletin du Congrès des chemins de fer*, janvier 1909, note sur « L'ergomètre d'inertie de J. Doyen », par M^{rs} HUBERTI et DOYEN.

wagon. Les déplacements des génératrices du cylindre sont donc proportionnels aux déplacements de l'essieu sur la voie, c'est-à-dire aux chemins parcourus par le train.

Les déplacements du cylindre parallèlement à l'axe sont déterminés par une roulette à jante tranchante B pressée contre le cylindre par un ressort ; le plan de rotation de cette roulette peut pivoter autour de l'axe C.

Lorsque le plan de rotation de la roulette tranchante B est perpendiculaire aux génératrices, son point de contact décrit une section droite sur le cylindre qui, dans ce cas, ne subit aucun déplacement parallèle à son axe. Cette section droite est représentée par *fg*, dans la figure 3 qui est le développement de la surface du cylindre.

Mais si le plan de la roulette B est amené à faire avec les génératrices du cylindre un angle $90 - \gamma$ (fig. 3), la trace sur le cylindre n'est plus une section droite, mais un arc d'hélice *FH* (fig. 2) représenté par *fh* sur la figure 3.

Il résulte de là que pendant que les génératrices du cylindre se sont déplacées de *fg*, le point de contact de la roulette a décrit sur le cylindre la ligne développée en *fh*, ce qui a obligé celui-ci à reculer sur son axe de la quantité

$$gh = fg \operatorname{tg} \gamma$$

La plume K suivant le cylindre dans tous ses déplacements parallèlement à l'axe, *gh* représente la variation d'ordonnée ($Y - Y_0$) de la courbe tracée sur le papier du wagon par l'ergomètre.

Mais nous avons vu que *fg* est proportionnel au chemin parcouru par le train, on a donc :

$$fg = A(E - E_0)$$

E et E_0 étant les chemins parcourus et A une constante, nous pouvons écrire :

$$gh = Y - Y_0 = A(E - E_0) \operatorname{tg} \gamma. \quad (I)$$

Voyons maintenant comment s'établit et se modifie l'orientation du plan de la rouelette B par rapport aux génératrices du

cylindre. Cette orientation ou, en d'autres termes, la grandeur de l'angle γ est déterminée par l'inclinaison de la barre AC (fig. 1 et 2) sur sa position primitive, et cette inclinaison elle-même est commandée par la masse pendulaire m (fig. 4) qui oscille autour de l'axe O .

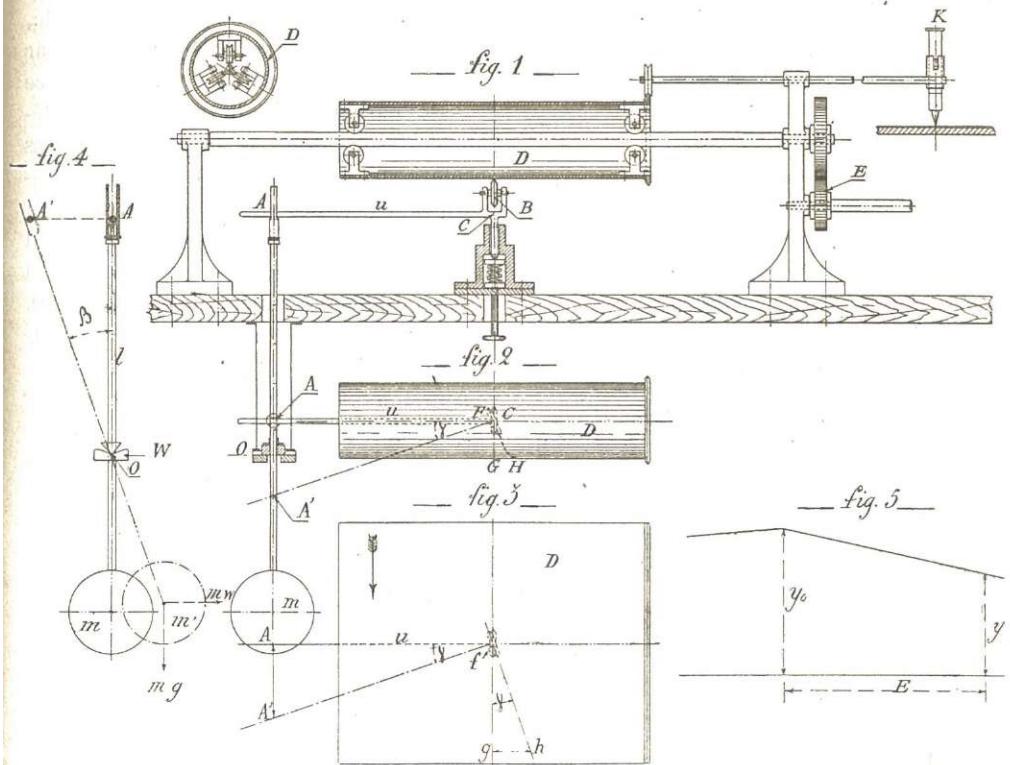


Fig. 1 à 5.

Si l'on appelle u la distance la plus courte du pivot c au plan d'oscillation du pendule (fig. 2), on aura à chaque instant :

$$AA' = u \operatorname{tg} \gamma.$$

Si, d'autre part, on désigne par l la distance OA de l'axe d'oscillation du pendule au point A où celui-ci attaque la

règle u , et par β l'angle AoA' , on aura :

$$AA' = l \operatorname{tg} \beta,$$

et en combinant avec l'équation ci-dessus :

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{l}{u} \operatorname{tg} \beta. \quad (II)$$

Cela posé, appelons W l'accélération qui affecte le train et par conséquent le

point de suspension O du pendule à un moment quelconque.

Sous l'action de l'inertie, la masse pendulaire prend une position oblique A'Om' dans laquelle elle est en équilibre sous l'effet de la force d'inertie mW de la pesanteur mg et de la tension de la tige $m'O$.

La somme des moments de ces forces par rapport au point O est donc nulle et l'on peut écrire :

$$mW \cdot Om' \cos \beta - mg \cdot Om' \sin \beta = 0;$$

d'où :

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{W}{g};$$

la valeur de $\operatorname{tg} \gamma$ (équation II) devient :

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{l}{u} \cdot \frac{W}{g}$$

et l'équation (I) prend la forme :

$$(Y - Y_0) = \frac{A(E - E_0)l}{ug} W. \dots \quad (\text{III})$$

Mais si M est la masse du train, la force accélératrice F (résultante des efforts moteurs et résistants) qui lui communique l'accélération W a pour expression :

$$F = MW = \frac{P}{g} W;$$

ce qui donne :

$$\frac{W}{g} = \frac{F}{P};$$

en remplaçant dans l'équation (III), on trouve :

$$Y - Y_0 = (E - E_0) \frac{Al}{u} \cdot \frac{F}{P}.$$

Si, enfin, nous considérons une tonne du poids du train, P devient égal à 1,000 kilogrammes et $\frac{Al}{1,000u}$ est une quantité

constante que nous désignerons par $\frac{1}{C}$, ce qui donne :

$$Y - Y_0 = \frac{1}{C} F (E - E_0) \dots \quad (\text{IV})$$

Cette équation montre clairement que la différence $Y - Y_0$ des ordonnées mesurées en deux points de la courbe tracée par l'ergomètre est proportionnelle, d'une part, à la force accélératrice F par tonne de train et, d'autre part, à l'espace $E - E_0$ parcouru par le train : cette différence mesure donc le *travail* des forces accélératrices (résultante des efforts moteurs et résistants) par tonne de train.

Dans le wagon-dynamomètre de l'État belge, les conditions de construction sont telles que la constante C est égale à 400, si les ordonnées sont mesurées en millimètres.

Appelons ψ l'effort total de la vapeur par tonne reporté à la jante et R la résistance par tonne de train entier, locomotive et tender compris, la force accélératrice F aura pour expression, à régulateur ouvert :

$$F = \psi - R,$$

et à régulateur fermé :

$$F = -R,$$

ψ étant égal à zéro dans ce dernier cas.

REMARQUE IMPORTANTE. — Avant d'entrer dans les détails de la méthode d'essai qui fait l'objet de la présente note, il est essentiel de signaler une propriété importante du pendule appliquée à la mesure de l'effort accélérateur.

Cette propriété est la suivante :

Dans un train en marche, les indications du pendule sont indifférentes à l'action de la gravité sur le train.

Supposons, pour simplifier, que la longueur du pendule est égale à 1 mètre, c'est-à-dire que le centre de gravité de la masse pendulaire est distant de 1 mètre de son point de suspension. Sur une pente de i millimètres par mètre, l'effort statique de la gravité tendra à faire avancer le centre de gravité de la masse pendulaire de i millimètres sur la position qu'il occuperait en palier. Mais l'effort dynamique de la gravité sur le train crée une composante accélératrice de i kilogrammes par tonne qui tend à faire reculer le centre de gravité précisément de i millimètres. Celui-ci, sollicité par deux forces égales et de signe contraire, reste donc dans la position que lui donneraient, *en palier*, les autres forces motrices ou résistantes auxquelles il est soumis.

Il résulte de cette précieuse propriété, découverte par Desdouits, ingénieur en chef des chemins de fer de l'État français :

que la résistance R , mesurée au moyen du pendule, est la somme des résistances par tonne (résistance au roulement, résistance de l'air, etc.) *propres au train lui-même*, abstraction faite de la gravité;

que $F = \psi - R$ est, à chaque instant, la valeur de la force accélératrice résultant de l'effort de la vapeur et des résistances propres du train, *quel que soit le profil de la voie*, et

que $\psi = F + R$ exprime, en toute circonstance, l'effort total de la vapeur reporté au point d'application des efforts moteurs et résistants, c'est-à-dire au point de contact des roues et du rail.

* * *

Nous allons montrer maintenant comment l'ergomètre permet de déterminer

les éléments nécessaires à l'étude d'une locomotive : résistance au roulement du train; effort et travail total de la vapeur; effort disponible à la grille; adhérence; résistance au roulement de la locomotive et du tender.

I. — Résistance au roulement du train soumis à l'essai.

La loi de la résistance au roulement du train sur lequel porte l'essai s'établit avec la plus grande facilité.

Supposons que l'on ait parcouru un chemin E , à régulateur fermé, avec une vitesse moyenne V et que l'ergomètre ait donné la courbe représentée figure 5. (On sait que les diagrammes recueillis dans le wagon-dynamomètre permettent de lire à chaque instant les vitesses et les chemins parcourus.)

Dans ce cas :

$$F = -R,$$

et, d'après l'équation (IV) :

$$F = \frac{C(Y - Y_0)}{E}.$$

Nous avons donc :

$$R = \frac{C(Y_0 - Y)}{E}.$$

R est la valeur de la résistance au roulement par tonne de train entier, locomotive et tender compris, correspondante à la vitesse V .

Si l'on a soin de multiplier les fermentures du régulateur aussi souvent que le permet la marche régulière du train et de les effectuer à des vitesses variées, on disposera à la fin du parcours d'un certain

nombre de valeurs de R ainsi que des vitesses correspondantes. En portant celles-ci en abscisses et les résistances en ordonnées, on obtient une série de points isolés représentés figure 6. La courbe qui relie ces points donne la loi de la résistance au roulement pour le jour de l'essai et le train considéré.

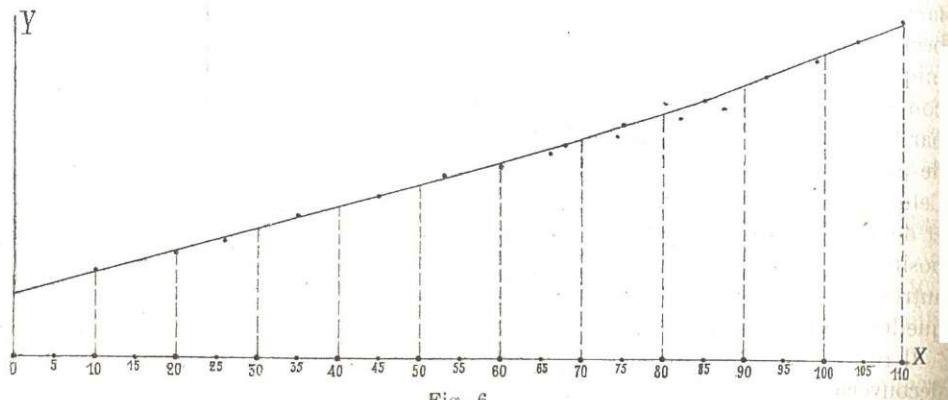


Fig. 6.

D'autre part, Y_0 et Y étant les ordonnées de la courbe de l'ergomètre au commencement et à la fin du kilomètre, on a :

$$F = \frac{C(Y - Y_0)}{1,000}$$

L'effort total de la vapeur *par tonne* est donc :

$$\psi = F + R = \frac{C(Y - Y_0)}{1,000} + R$$

Pour un train de poids P cet effort total sera :

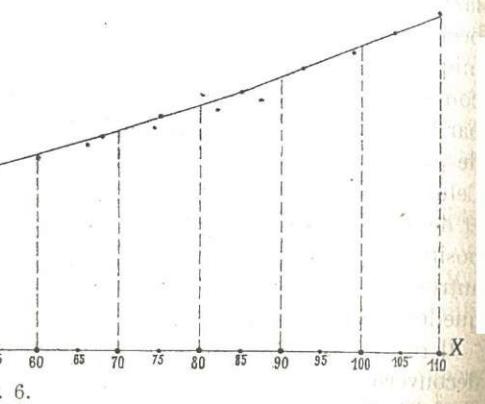
$$\chi = \frac{\psi P}{1,000} = \frac{P}{1,000} \cdot \frac{C(Y - Y_0)}{1,000} + \frac{P}{1,000} R$$

En calculant χ pour chacun des kilomètres parcourus à régulateur ouvert, on a les efforts de la vapeur, aux différentes vitesses et pour les différentes positions des organes de la distribution, employées

II. — Effort total de la vapeur

$$\psi = F + R$$

Considérons une section de voie, un kilomètre par exemple, parcouru, à régulateur ouvert, à la vitesse moyenne V . Le diagramme figure 6 nous donne la valeur de la résistance R par tonne de train à cette vitesse.



pendant l'essai. La courbe ABC (fig. 7) est obtenue en portant les vitesses en abscisses et les valeurs de χ en ordonnées.

La facilité avec laquelle notre méthode permet de mesurer en route l'effort total de la vapeur nous a conduit à aborder des problèmes très intéressants, parmi lesquels nous pouvons citer :

La recherche du degré d'admission et de la position du régulateur les plus efficaces pour une vitesse donnée ;

La comparaison, aux différentes vitesses, de la simple expansion et du système compound, ou bien de la vapeur saturée et de la vapeur surchauffée.

En ce qui concerne ce dernier point, par exemple, nos expériences ont vérifié pratiquement une loi que la théorie faisait prévoir : c'est que, toutes choses égales

d'ailleurs, l'effort disponible aux cylindres est notablement plus considérable aux grandes vitesses avec la vapeur surchauffée qu'avec la vapeur saturée.

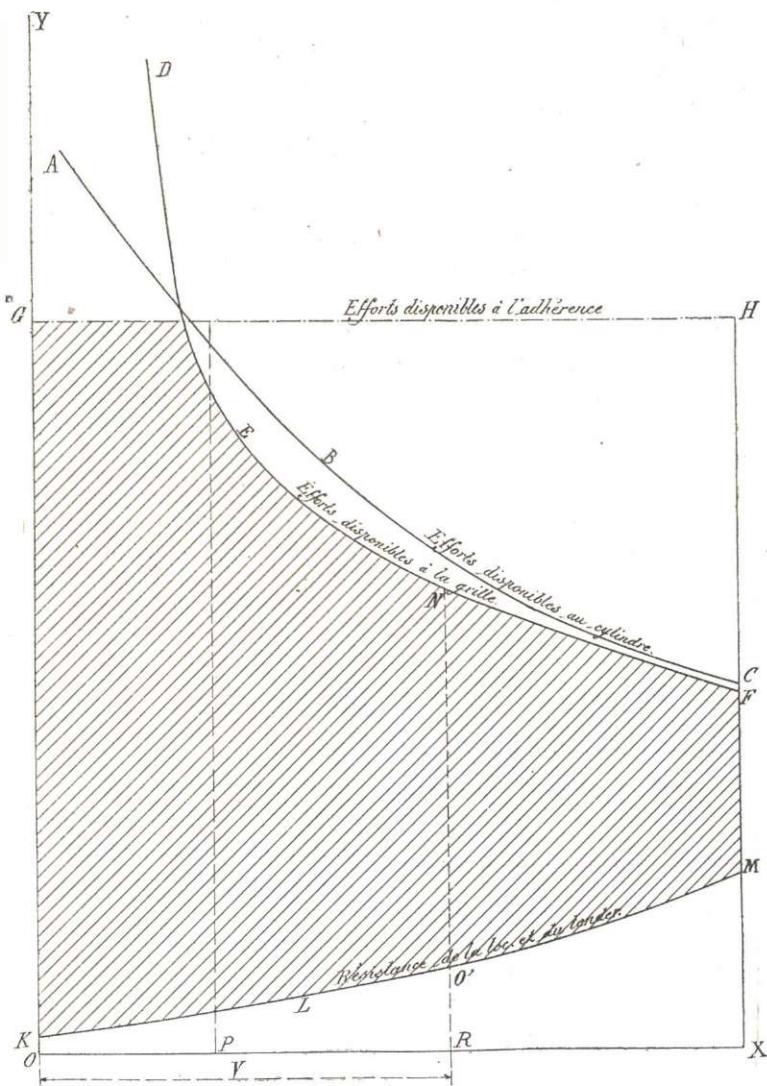


Fig. 7.

III. — Travail total de la vapeur.

Nous venons de voir que le dépouillement d'un essai comporte le calcul de

l'effort total γ de la vapeur pour chacun des kilomètres parcourus à régulateur ouvert. La somme des valeurs de γ multipliée par 1,000 mètres donnera évidem-

ment le travail total T fourni par la vapeur :

$$T = 1,000 \Sigma \lambda \text{ kilogrammètres.}$$

Si π est le poids total du charbon brûlé pendant l'essai, la quantité λ de charbon, nécessaire pour produire un travail de 10,000 kilogrammètres à la jante, aura pour valeur :

$$\lambda = \frac{10,000 \pi}{T}.$$

λ est une des caractéristiques des plus intéressantes d'une locomotive, car elle permet d'établir les valeurs relatives de différents moteurs au point de vue de la consommation de charbon.

En expérimentant sur trois machines de systèmes différents, toutes trois en très bon état d'entretien, nous avons pu établir les résultats suivants :

	<i>Locomotive à simple expansion, à vapeur surchauffée.</i>	<i>Locomotive compound, à vapeur saturée.</i>	<i>Locomotive à simple expansion, à vapeur saturée.</i>
Valeurs de λ .	47 grammes.	52,5 grammes	57 grammes.
Valeurs relatives de λ .	1	1,117	1,215

Les valeurs absolues de λ dépendent beaucoup de l'état d'entretien des machines et en particulier de l'état des cercles de piston; mais, à égalité d'entretien, les rapports entre ces valeurs subsistent.

IV. — Efforts disponibles à la grille.

L'étude des détails de construction de la locomotive ne peut trouver place dans le cadre de cet exposé : nous admettrons

donc que les relations entre la grille, d'une part, et la surface de chauffe, le tirage, la nature du charbon employé, etc., d'autre part, sont logiquement établies.

Il doit être entendu, par conséquent, qu'en parlant de la *puissance de la grille* nous envisageons la puissance du générateur de vapeur tout entier.

La capacité de combustion d'une grille dépend, en premier lieu, du tirage. Or, dans la locomotive le tirage est fonction du nombre de coups de piston par seconde, c'est-à-dire de la vitesse du train et du diamètre des roues motrices. La quantité de charbon que l'on peut brûler dans de bonnes conditions, sur une grille donnée par mètre carré et par heure, dépend donc de la vitesse et croît avec elle. Nous admettrons les chiffres suivants, qui paraissent répondre assez bien aux conditions moyennes de notre pratique :

300 kilog.	aux vitesses inférieures à	40 kilom.
350	à la vitesse de	60 —
450	—	80 —
575	—	100 —
650	—	120 —

Soit S la surface d'une grille en mètres carrés. Aux vitesses inférieures à 40 kilomètres, on pourra y brûler par heure

$$300,000 \times S \text{ grammes de charbon,}$$

représentant une capacité de travail de

$$\frac{300,000 \times S \times 10,000}{\lambda} \text{ par heure}$$

ou de

$$\frac{300,000 \times S \times 10,000}{\lambda \times 3,600} \text{ par seconde}$$

Mais la capacité de travail de la grille par seconde a également pour valeur Qv , Q étant l'effort disponible à la grille et v la

vitesse en mètres par seconde; on peut donc écrire :

$$Qv = \frac{300,000 \times S \times 10,000}{\lambda \times 3,600},$$

d'où l'on tire

$$QV = \frac{3,000,000 S}{\lambda}$$

en remplaçant v par $\frac{V}{3,6}$.

Le deuxième membre de cette équation étant constant, celle-ci représente une hyperbole ayant pour asymptotes l'axe des Q (ordonnées) et l'axe des V (abscisses).

Cette hyperbole aura pour équation :

à la vitesse de 60 kilomètres :

$$QV = \frac{3,500,000 S}{\lambda};$$

à la vitesse de 80 kilomètres :

$$QV = \frac{4,000,000 S}{\lambda}$$

et ainsi de suite.

La courbe DENF de la figure 7 est la courbe-enveloppe de ces différentes hyperboles et donne donc, pour chacune des vitesses V portées en abscisse, la valeur Q de l'effort disponible à la grille porté en ordonnée.

V. — Adhérence.

On sait, depuis les expériences devenues classiques de Douglas-Galton et de Westinghouse que le coefficient de frottement entre deux surfaces métalliques diminue quand la vitesse relative de ces deux surfaces augmente.

Or, l'adhérence étant le produit du poids des roues motrices sur le rail par le coefficient de frottement entre rail et bandage,

il convient d'examiner, tout d'abord, quelle est la vitesse avec laquelle le point de contact du bandage se déplace par rapport au rail.

Soit (fig. 8) v la vitesse du train et ω la vitesse angulaire d'un point quelconque A de la surface de roulement des bandages. Ce point A est soumis à l'action de deux vitesses, l'une v , parallèle au rail, l'autre $r\omega$ dirigée suivant la tangente à la roue en A . Sa vitesse réelle, parallèlement au rail, est donc la résultante v' de v et de la projection $r\omega \cos \alpha$ de $r\omega$ sur la direction de v .

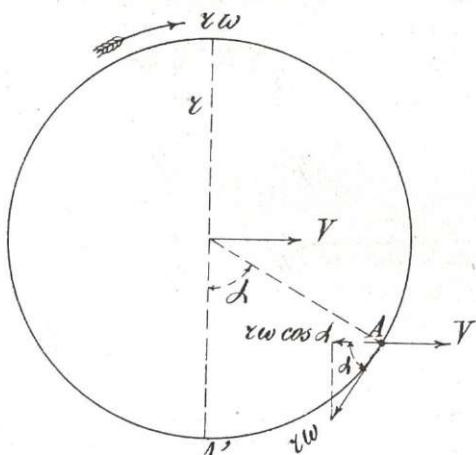


Fig. 8.

On a :

$$v' = v - r\omega \cos \alpha.$$

Dans le cas particulier où le point A est le point de contact A' de la roue et du rail, $\alpha = 0$, $\cos \alpha = 1$ et par conséquent $v' = v - r\omega$.

Il résulte de cette égalité qu'aussi longtemps que la roue tourne à une vitesse $r\omega$ égale à la vitesse de translation du train $v' = 0$, c'est-à-dire que le point de contact A' est, à chaque instant, centre instant-

tané de rotation. v' étant égal à zéro, le coefficient d'adhérence est maximum et par conséquent constant, quelle que soit la vitesse v du train.

Mais ce coefficient, indifférent à la vitesse du train, n'échappe malheureusement pas à l'influence des intempéries et de l'état du rail, et il résulte de nos essais qu'il est prudent de ne pas compter, en pratique, sur une valeur supérieure à 0.45.

Cela posé, voici comment nous procérons pour mesurer le coefficient d'adhérence lorsque l'état du rail est assez mauvais pour que cette mesure présente de l'intérêt.

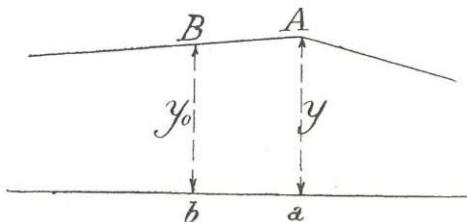


Fig. 9.

Nous poussons l'effort de la vapeur assez loin pour déterminer le pivotage. Dès que celui-ci commence, r_m devient plus grand que v , et v' acquiert une valeur réelle. Il est vrai que cette valeur est négative, mais le sens importe peu, puisque c'est la vitesse avec laquelle les deux surfaces se déplacent l'une par rapport à l'autre qui fait varier le coefficient de frottement. Le coefficient d'adhérence diminue donc et l'effort à la jante que développait la locomotive perd instantanément une partie considérable de sa valeur. Ce phénomène se traduit par l'allure de la courbe de l'ergomètre, représentée figure 9. Le point A où l'ordonnée de la courbe est maximum correspond au commencement du pivotage.

Lors du dépouillement du diagramme, nous considérons la section ab du parcours qui précède immédiatement le point A et nous déterminons l'effort moyen de la vapeur à la jante z sur cette section. Cet effort vaut :

$$z = \psi \frac{P}{4,000} = \frac{P}{4,000} \left(\frac{C(Y - Y_0)}{ab} + R \right).$$

En prenant la section ab assez courte, 50 mètres, par exemple, on peut admettre, sans grande erreur, que z est la valeur de cet effort au point A (1).

(1) Le dynamomètre d'inertie de Desdouits permet de mesurer cet effort à l'instant même où le patinage se produit.

Jusqu'ici on a hésité à se servir de cet appareil, précieux dans bien des cas, à cause de la difficulté que présentait la détermination de la ligne des zéros des diagrammes qu'il trace. Mais avec l'ergomètre cette difficulté n'existe plus et la ligne des zéros s'obtient très aisément.

En effet, soient, pour la distance E parcourue en t secondes :

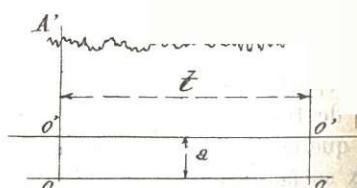
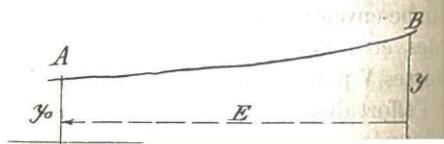


Fig. 14.

AB le diagramme de l'ergomètre et A'B' celui de Desdouits.

Du diagramme AB, nous tirons la valeur moyenne

p étant le poids adhérent, le coefficient d'adhérence α à l'instant du pivotage est :

$$\alpha = \frac{\gamma}{p}$$

Le diagramme de l'adhérence GH (fig. 7) a été obtenu en prenant $\alpha = 0.45$.

VI. — Résistance au roulement de la locomotive et du tender.

Nous avons vu que l'effort total moyen de la vapeur, sur un kilomètre parcouru à la vitesse moyenne V et avec une résistance moyenne R , a pour expression :

$$\gamma = \frac{P}{4,000} \left(C \frac{Y - Y_0}{4,000} + R \right)$$

dans laquelle P est le poids total du train y compris la locomotive et le tender, R la résistance par tonne du train entier, Y_0 et Y les ordonnées de la courbe de l'ergomètre au commencement et à la fin du kilomètre.

F de l'effort mesuré par le pendule pendant le parcours E :

$$F = \frac{C(Y - Y_0)}{E}$$

Donnons au diagramme $A'B'$ de Desdouits une ligne de zéros quelconque $0'0'$ et planimétrons l'aire $0'A'B'0'$. La surface S ainsi obtenue représente un nombre de kilogrammes-secondes que nous désignons par αS .

Or, l'effort moyen F' correspondant à αS kilogrammes-secondes est donné par la relation :

$$F' = \frac{\alpha S}{t}$$

Mais F' doit être égal à F et la différence $F - F'$ ne peut provenir que de l'erreur commise sur la position de la ligne des zéros $0'0'$. La véritable ligne des zéros 00 se trouvera donc à une distance α de la première telle, que l'effort mesuré par α soit égal à $F - F'$.

Soient :

P' , le poids de la locomotive et du tender,

R' , leur résistance au roulement par tonne,

P'' , le poids du train remorqué,

R'' , sa résistance au roulement par tonne.

La valeur de γ peut être mise sous la forme :

$$\gamma = \frac{P'}{4,000} \left(C \frac{Y - Y_0}{4,000} + R' \right) + \frac{P''}{4,000} \left(C \frac{Y - Y_0}{4,000} + R'' \right).$$

Mais

$$\frac{P''}{4,000} \left(C \frac{Y - Y_0}{4,000} + R'' \right)$$

n'est autre chose que l'effort moyen au crochet de traction sur le kilomètre considéré, dont la valeur nous est donnée par le totalisateur du travail au crochet du wagon-dynamomètre.

Si nous appelons T' la valeur de ce travail, nous pouvons écrire :

$$\gamma = \frac{P'}{4,000} \left(C \frac{Y - Y_0}{4,000} + R' \right) + \frac{T'}{4,000};$$

d'où :

$$\frac{P'}{4,000} R' = \gamma - \frac{T'}{4,000} - \frac{P'}{4,000} C \frac{Y - Y_0}{4,000}.$$

$\frac{P'}{4,000} R'$ est la résistance totale de la machine et de son tender à la vitesse V . Les valeurs de cette résistance aux différentes vitesses portées en ordonnées donnent le diagramme KLO'M (fig. 7).

VII. — Discussion du diagramme (fig. 7).

L'aire hachurée, limitée par les différentes courbes dont nous avons exposé la genèse, représente la puissance de la locomotive étudiée.

Pour une vitesse quelconque OR , la portion d'ordonnée $O'N$, comprise dans cette aire, mesure l'effort au crochet de traction que cette machine peut développer et sou-

tenir aussi longtemps que le foyer peut brûler convenablement les quantités de combustible que nous avons admises plus haut.

On voit que la puissance d'une locomotive dépend de l'adhérence pour les vitesses inférieures à OP , tandis que pour des vitesses supérieures elle est limitée par la capacité de travail du moteur proprement dit et du générateur de vapeur.

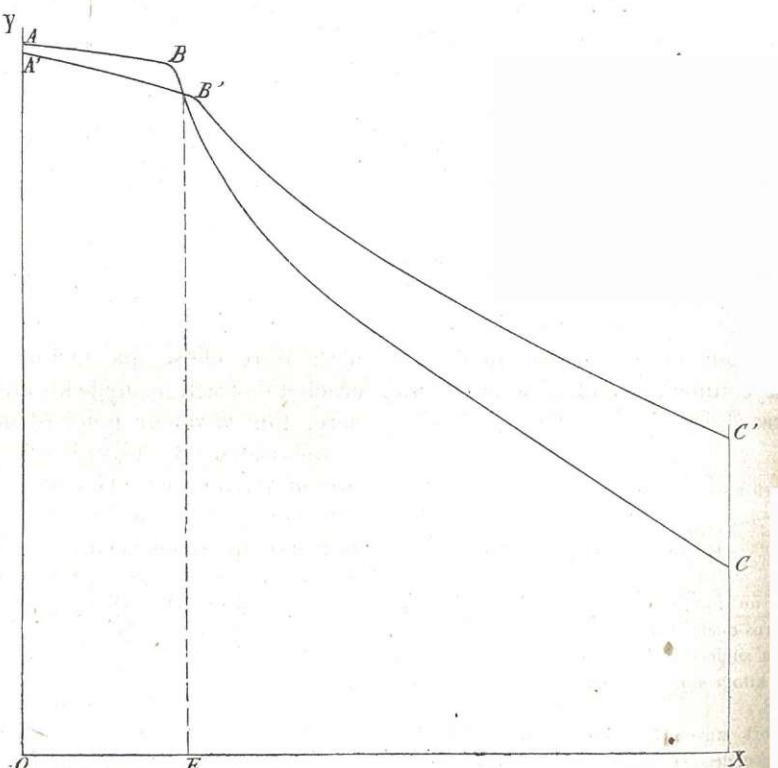


Fig. 10.

VIII. — Courbe caractéristique d'une locomotive.

Si nous portons en ordonnées les valeurs de $O'N$ et en abscisses celles de V , nous

obtenons une nouvelle courbe ABC (fig. 10) qui donne lieu à des considérations fort intéressantes et définit une locomotive.

Par exemple, le diagramme ABC étant

donné par une locomotive *Ten wheel* (tel le type 9 de l'État belge), une locomotive *Pacific* de même poids adhérent mais pourvue d'un générateur plus puissant et par conséquent plus lourd fournira le diagramme A'B'C'. Ce diagramme montre que pour les vitesses inférieures à OE la *Ten wheel* l'emportera sur la *Pacific*, mais que celle-ci prend l'avantage au delà de cette vitesse. Il en résulte que la première con-

viendra pour les trains à arrêts relativement fréquents et sur les lignes à profil très accidenté où la vitesse dans les rampes est forcément faible, tandis que la *Pacific* s'imposera pour les trains directs à grande vitesse et à forte charge. Nos deux courbes montrent aussi que c'est avec raison qu'on a donné au type 10 (la *Pacific* belge) un poids adhérent supérieur à celui du type 9 (la *Ten wheel*).

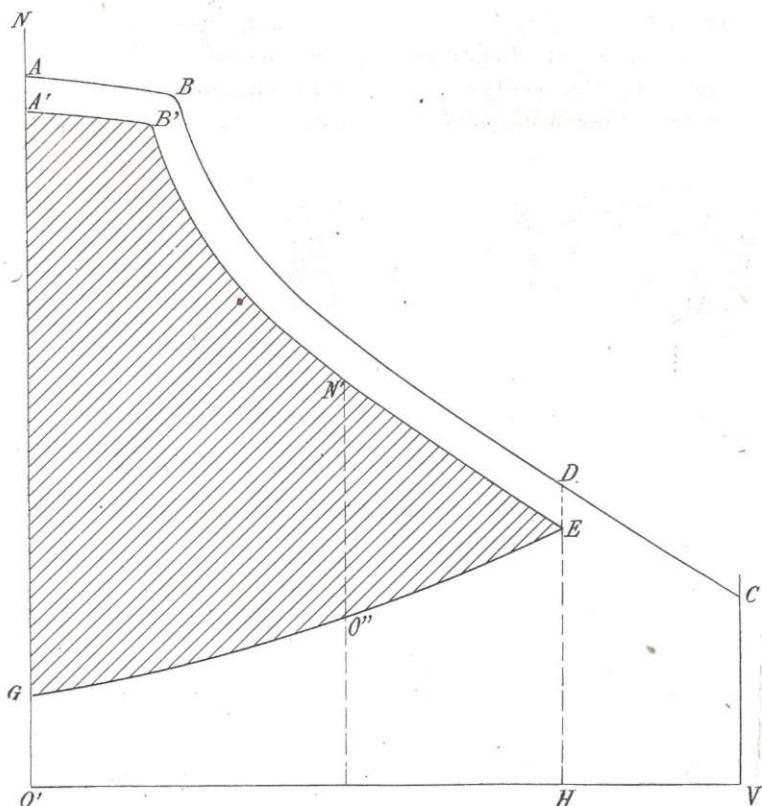


Fig. 11.

Reprendons maintenant le diagramme ABC, caractéristique de la locomotive (fig. 11), et traçons la courbe GO''E qui

représente aux différentes vitesses la résistance totale au roulement du train qu'elle doit remorquer.

Il est visible qu'à la vitesse maximum OH du train la locomotive est capable de fournir un effort supérieur à la résistance du train, *en palier et à vitesse constante*, de la quantité DE. Ce surcroît d'effort permettra de combattre les résistances anormales et de regagner les retards. Afin de conserver ce surcroît d'effort disponible à toutes les vitesses, nous remplacerons dans ce qui va suivre la courbe ABD par une courbe parallèle A'B'N'E à une distance DE de la première.

La partie hachurée du diagramme limitée par cette dernière courbe et la courbe GO''E représentera la puissance de

la locomotive disponible *après avoir satisfait à toutes les exigences de la résistance au roulement, en palier et à vitesse constante de la locomotive, du tender et du train remorqué*, tout en conservant un surcroît d'effort ED pour parer aux éventualités.

En portant en abscisses les vitesses et en ordonnées les parties O''N' des ordonnées de la figure 11 interceptées par l'aire hachurée, nous tracerons une nouvelle courbe ABH (fig. 12) qui nous permettra de résoudre très commodément tous les problèmes qui se posent dans la remorque d'un train; nous donnerons deux exemples.

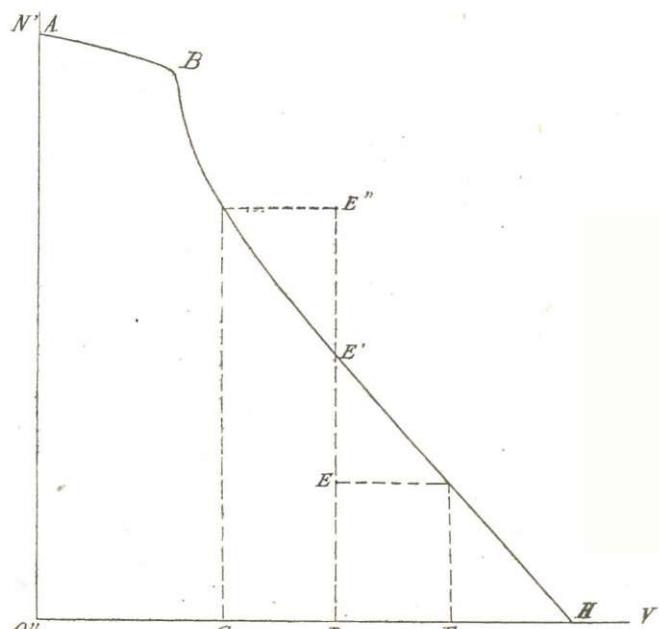


Fig. 12.

Premier exemple : Supposons (fig. 12) qu'ayant atteint la vitesse O''D, le train rencontre une rampe de i millimètres par

mètre. L'effort supplémentaire nécessaire pour gravir cette rampe sera P_i , P étant le poids en tonnes du train entier.

ions en D l'ordonnée et portons sur ci une longueur $DE = Pi$.

ois cas peuvent se présenter :

Le point E reste en dessous de la e ABH. Dans ce cas, la locomotive accélérer sa marche et malgré la e atteindre sa vitesse $O''F$;

Le point E tombe en E' , sur la courbe : la locomotive peut gravir la rampe perdre de la vitesse;

3^e Le point E tombe en E'' , au-dessus de la courbe ABH : la locomotive devra ralentir sa marche et la vitesse descendra à la valeur $O''G$.

Deuxième exemple : Proposons-nous (fig. 13) de déterminer le temps t et le parcours E qui seront nécessaires à un train pour passer de la vitesse $O''D = V_0$ à la vitesse $O''E = V$ ⁽¹⁾.

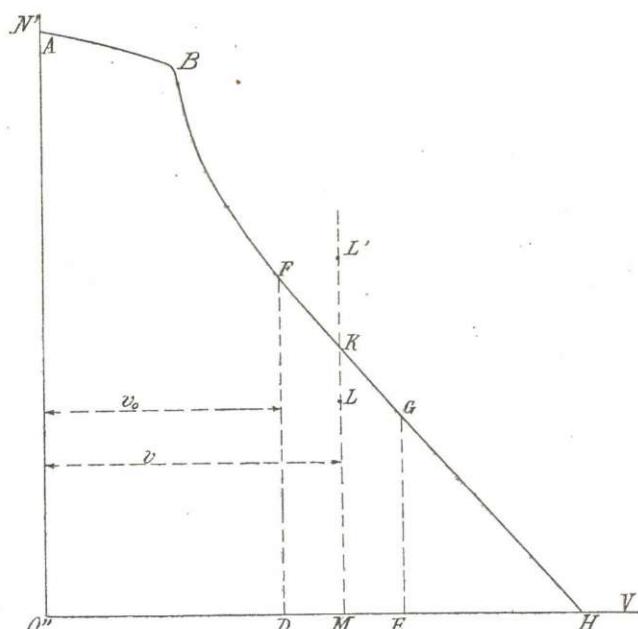


Fig. 13.

Nous supposerons que la portion FG de la courbe qui est comprise entre les vitesses V_0 et V est une ligne droite, ce qui revient à admettre que l'effort *moyen* disponible *en palier* entre les points F et G est égal à :

$$KM = \frac{FD + EG}{2}.$$

Le temps t et l'espace E sont donnés par :

$$t = \frac{4,000 P}{g} \frac{V - V_0}{KM}$$

et

$$E = \frac{4,000 P}{g} \frac{V^2 - V_0^2}{KM}$$

(1) Dans la figure, la vitesse correspond erronément à $O''M$ au lieu de $O''E$.

Si la voie est en rampe de i pour mille, l'effort moyen disponible devra être réduit de Pi et en portant sur l'ordonnée MK la longueur $KL = Pi$, nous aurons la valeur ML qui devra, dans les formules ci-dessus, remplacer KM .

Si au contraire la voie est en pente de i' pour mille, MK devra être augmenté de $Pi' = KL'$ et c'est ML' qui devra être substitué à MK .

Ce qui précède montre que si l'on connaît la courbe caractéristique ABC d'une locomotive, on peut déterminer la vitesse qu'elle peut pratiquement prendre en chaque point du parcours en remorquant un train donné, et l'on voit combien l'emploi de cette méthode facilite et précise l'établissement des horaires.

IX. — Les points faibles de la méthode belge.

Nous avons dit plus haut que, pour l'étude de certains détails, notre méthode serait heureusement complétée par l'intervention des appareils américains.

Ces détails sont les suivants :

1^o Dans l'évaluation de l'effort total de la vapeur $\psi = F + R$, R est la résistance au roulement à régulateur fermé, alors que l'exactitude exigerait que l'on considérât la résistance à régulateur ouvert.

Nous ne pensons pas que l'erreur ainsi commise soit bien considérable; mais pour l'évaluer, le seul moyen serait de comparer, pour un certain nombre de tours de roues, le travail de la vapeur obtenu par notre méthode au travail indiqué. Or, jusqu'à présent, nous ne connaissons que la méthode américaine qui puisse donner, avec une exactitude suffi-

sante, le travail indiqué, totalisé pendant un temps suffisamment long;

2^o D'après notre méthode, la caractéristique λ est une moyenne, c'est-à-dire qu'elle donne, pour tout un voyage, la quantité moyenne de charbon nécessaire pour produire 10,000 kilogrammètres à la jante. Or, il serait très intéressant de connaître dans quelles limites λ varie avec la vitesse et avec la position des organes de la distribution. Ici encore la combinaison des méthodes américaine et belge donnerait des résultats complets : la méthode belge déterminant le nombre de kilogrammètres produits à la jante à une vitesse donnée et pour une position déterminée des organes de la distribution, et l'appareil du « Pennsylvania Railroad » mesurant ensuite exactement la consommation de charbon par heure à cette vitesse et pour les mêmes conditions de distribution;

3^o Enfin il est bien difficile d'apprécier exactement les variations que produit l'augmentation de vitesse sur la capacité de combustion d'une grille, avec les ressources dont nous disposons, et les chiffres que nous avons donnés plus haut ne sont évidemment qu'approximatifs.

La méthode américaine se prêterait admirablement et très simplement à la solution de ce problème.

Mais si l'on parvient à mesurer la consommation d'eau en route, on diminue notablement l'importance des désideratums qui réclament l'intervention de la méthode américaine, puisque à l'étude des variations de λ se trouvera substituée celle des variations de la consommation de vapeur que nous appelons μ et dont le rapport avec λ , pour un combustible donné, est connu avec une approximation suffi-

sante. Mais, la mesure de la consommation de l'eau entre deux points donnés se ramène à la mesure de la différence de niveau de l'eau dans le tender entre ces deux points, si l'on a pris la précaution de jauger préalablement le tender du train soumis à l'essai.

Mr Anderson, chef du bureau des études du « Midland Railway », nous a suggérée l'idée d'une disposition si simple, pour la mesure de la hauteur de l'eau dans le tender, qu'il nous a paru intéressant d'en essayer l'application dans le wagon-dynamomètre de l'État belge.

Voici en quoi consiste ce petit appareil

(fig. 15) : sur l'une des parois du wagon-dynamomètre W.D est fixé un tube en verre recourbé en forme d'U à branches inégales. Ce tube contient de l'eau qui occupe naturellement le même niveau dans ses deux branches. La longue branche B est ouverte à son extrémité supérieure : la branche la plus courte A est reliée par un bout de tuyau en caoutchouc à un tube C connecté par un tuyau flexible F avec un tube D qui est fixé au tender et plonge presque jusqu'au fond de celui-ci. Un petit tuyau E, muni d'un robinet R, est relié à la conduite générale du frein, ce qui permet d'envoyer de l'air comprimé dans le tuyau C.

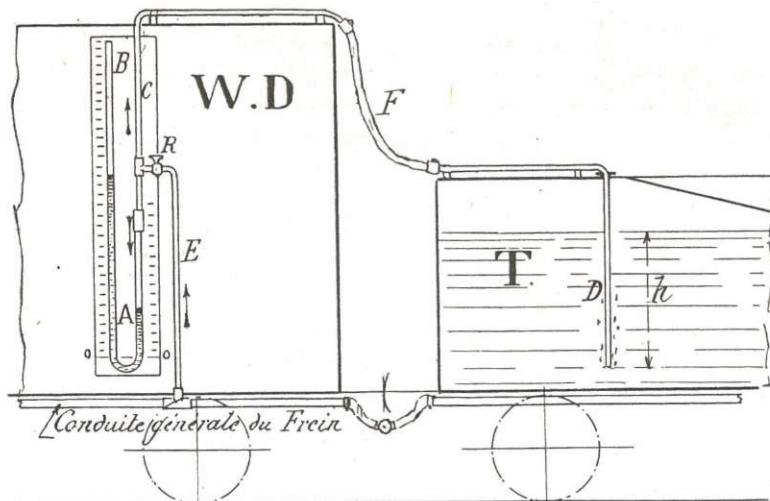


Fig. 15.

Pour mesurer la hauteur de l'eau dans le tender on ouvre le robinet R. Aussitôt l'air comprimé s'échappe par les tuyaux C, F et D, refoulant devant lui la colonne d'eau h qui mesure la pression de l'air restant dans ces tuyaux. Mais cet air comprimé, qui pénètre en même temps dans le

tube en verre par la petite branche A, détermine dans celui-ci une dénivellation que l'on peut lire sur une échelle graduée et qui est forcément égale à la hauteur h . La différence $h - h'$ entre les valeurs trouvées au commencement et à la fin du parcours considéré donne la quantité d'eau qui a

passé du tender dans la locomotive. Le trou du robinet doit être très petit afin que la vitesse de sortie de l'air en D soit lente et que les frottements sur les parois des tubes C et D soient aussi faibles que possible. Un très petit trou permet, d'ailleurs, de laisser le robinet ouvert constamment, sans qu'il se produise une dépression

appréciable dans la conduite générale du frein.

* * *

La méthode que nous venons de décrire est sortie de la collaboration de l'auteur de cette note et de M^r A. Huberti, professeur à l'Université de Bruxelles.